

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSE ROBERTO BERITHE PEDROSA

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESALINHAMENTO ANGULAR
USANDO UMA ABORDAGEM PONTO-A-PLANO COM APOIO DE CAMPO
DERIVADO DE NUVEM LiDAR

CURITIBA
2019

JOSE ROBERTO BERITHE PEDROSA

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESALINHAMENTO ANGULAR
USANDO UMA ABORDAGEM PONTO-A-PLANO COM APOIO DE CAMPO
DERIVADO DE NUVEM LiDAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

CURITIBA
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

P372d Pedrosa, Jose Roberto Berithe

Determinação dos parâmetros de desalinhamento angular usando uma abordagem ponto-a-plano com apoio de campo derivado de nuvem lidar [recurso eletrônico] / Jose Roberto Berithe Pedrosa, 2019.

Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos

1. Imagens digitais. 2. Câmeras fotográficas digitais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Daniel Rodrigues dos. III. Título.

CDD 526.982

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

TERMO DE APROVAÇÃO




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40061016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de JOSÉ ROBERTO BERITHE PEDROSA intitulada: **DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESALINHAMENTO ANGULAR USANDO UMA ABORDAGEM PONTO-A-PONTO COM APOIO DE CAMPO DERIVADO DE NUVEM LIDAR**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no ato de defesa.

A entrega do título de mestre está sujeita à homologação pelo Colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 25 de Abril de 2019.


DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


EUDON APARECIDO MENEZES
Avaliador Interno (UFPR)


ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
Avaliador Interno (UNESPP)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha Família, principalmente a minha esposa Kátia, com profunda gratidão, pelo apoio paciente, compartilhando todos os momentos ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro pela oportunidade de aperfeiçoar a minha formação profissional. Ao professor e amigo Daniel Rodrigues dos Santos, pela orientação, colaboração e confiança no meu trabalho. Ao professor e amigo José Eduardo Gonçalves, pesquisador do SiMePar, o verdadeiro Tubalcaim em drones, pelos ensinamentos transmitidos. Aos professores do Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, pelos conhecimentos transmitidos. Ao Instituto LATEC e à empresa TOPOCART por terem cedido os dados na pesquisa.

“À vaincre sans péril, on triomphe sans gloire.”

Pierre Corneille

RESUMO

A orientação direta de imagens é uma tarefa essencial para a extração de produtos fotogramétricos com alto grau de confiabilidade. Contudo, para se obter produtos cartográficos com acurácia e precisão posicional desejados é necessário realizar a calibração completa do sistema de mapeamento que envolve a determinação dos parâmetros de orientação interior da câmera e a estimativa dos parâmetros de montagem do sistema. Os parâmetros de montagem são representados pelo braço do sistema, que corresponde ao deslocamento linear entre a origem do sistema referencial INS e o centro perspectivo da câmera, e os parâmetros de orientação relativa, que representam o desalinhamento angular entre o sistema referencial do INS e o sistema referencial fotogramétrico. Este trabalho apresenta um método para estimativa do parâmetro de desalinhamento angular do sistema usando uma abordagem ponto-a-plano e apoio de campo extraído de dados LiDAR. O método proposto foi testado em um sub-bloco de imagens aéreas. Os resultados obtidos mostraram que a abordagem desenvolvida estima, efetivamente, os parâmetros de desalinhamento angular propiciando acurácia posicional na determinação de pontos no espaço objeto.

Palavras-chave: Orientação direta de imagens, abordagem ponto-a-plano, sistema LiDAR, parâmetros de montagem do sistema.

ABSTRACT

The direct orientation of images is an essential task for the extraction of photogrammetric products with a high degree of reliability. However, in order to obtain cartographic products with desired positional accuracy, it is necessary to carry out the calibration of the mapping system, which involves the determination of the camera's internal orientation parameters and the estimation of the system's mounting parameters. The geometric relationship between the sensors (mounting parameters) that are the lever-arm offset between the sensors, and the misalignment (boresight angles) between the INS referential system and the photogrammetric reference system. This work presents a method for estimating the boresight angles of the system using a point-to-plane approach and reference ground control extracted from LiDAR data. The proposed method was tested in a sub-block of images (six images from two opposite flight strips). The obtained results showed that the developed approach effectively estimates misalignment angles, providing positional accuracy in the determination of points in the object space.

Keywords: Direct Georeferencing, Point-to-Plan Approach, LiDAR system, Boresight Angles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA	17
FIGURA 2 – EXEMPLO DE CÂMERA DIGITAL (a), SENSOR CMOS (b), E IMAGEM DIGITAL AÉREA (c)	22
FIGURA 3 – CÂMERA DIGITAL ADS40 (a), CÂMERA DIGITAL DMC (b), E CÂMERA DIGITAL VEXCEL UCD (c)	23
FIGURA 4 – SISTEMA REFERENCIAL DIGITAL	25
FIGURA 5 – SISTEMA REFERENCIAL COM ORIGEM NO CENTRO DA IMAGEM	25
FIGURA 6 – ESQUEMA DE TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA REFERENCIAL DIGITAL PARA O SISTEMA REFERENCIAL COM ORIGEM NO CENTRO DA IMAGEM	26
FIGURA 7 – SISTEMA REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO	27
FIGURA 8 – SISTEMA REFERENCIAL GEOCÊNTRICO	29
FIGURA 9 – ROTAÇÕES DA PLATAFORMA SOBRE O SISTEMA REFERENCIAL NED	30
FIGURA 10 – SISTEMA REFERENCIAL DA PLATAFORMA E NED	30
FIGURA 11 – DEFINIÇÕES DOS SISTEMAS DE COORDENADAS E DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO UTILIZADOS NA FOTOGRAMETRIA: SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO, SISTEMA DE COORDENADAS GEOCÊNTRICAS, E ÂNGULOS DE ROTAÇÃO	31
FIGURA 12 – DEFINIÇÃO DE ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DA IMAGEM PARA O SISTEMA BLUH E PATB	32
FIGURA 13 – DESALINHAMENTO DOS SISTEMAS	35
FIGURA 14 – INS STRAPDOWN E INS GIMBALED	37
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO GNSS/INS	39
FIGURA 16 – PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA	40
FIGURA 17 – GEOMETRIA DO MODELO DE COLINEARIDADE MODIFICADA (MÉTODO POR ETAPAS)	41
FIGURA 18 – GEOMETRIA DO MODELO DE COLINEARIDADE MODIFICADA (MÉTODO SIMULTÂNEO)	43
FIGURA 19 – RELAÇÃO ENTRE OS REFERENCIAIS DO SISTEMA LIDAR AEROTRANSPORTADO	46
FIGURA 20 – ÁREA DE ESTUDO (a), SENSOR DE IMAGEAMENTO (b), E IMAGEM SINTÉTICA (c)	52
FIGURA 21 – SENSOR LIDAR (a), RECORTE DA IMAGEM HIPSOMÉTRICA (b)	53
FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO PROPOSTO	55
FIGURA 23 – PLANO DE TELHADOS EXTRAÍDOS DA NUVEM LIDAR (a), PONTO IMAGEM CORRESPONDENTE (b)	59
FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DO BLOCO, SUB-BLOCO E LCPs DA ÁREA DE ESTUDO	65

FIGURA 25 – (a) NUVEM DE PONTOS LiDAR ORIGINAL, (b) RESULTADO OBTIDO COM O FILTRO MORFOLÓGICO PROGRESSIVO, (c) PLANOS DE TELHADOS EXTRAÍDOS COM O ALGORITMO RANSAC, (d) IMAGEM APROXIMADA DOS PLANOS EXTRAÍDOS	67
FIGURA 26 – (a) CONFIGURAÇÃO DOS SUB-BLOCOS NOS SENTIDOS SUDOESTE E NORDESTE, (b) DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS DE TELHADO	68
FIGURA 27 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA (a), E ALTIMÉTRICA (b) PARA O EXPERIMENTO A	69
FIGURA 28 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA (a), E ALTIMÉTRICA (b) PARA O SENTIDO NORDESTE	72
FIGURA 29 – DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA (a) E ALTIMÉTRICA (b) PARA O SENTIDO SUDOESTE	72
FIGURA 30 – EMQ PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO OBTIDO COM O MÉTODO PROPOSTO E COM O MÉTODO DE COSTA (2019)	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA	19
TABELA 2 – CÁLCULO DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO ω φ κ UTILIZANDO AS MATRIZES DE ROTAÇÃO BLUH E PATB	33
TABELA 3 – VALORES DE ERRO MÉDIO (EM) E ERRO PADRÃO (EP) EM METROS, PARA A PLANIMETRIA E ALTIMETRIA PARA CARTA ORTOIMAGEM	51
TABELA 4 – RESULTADOS DOS POIs CALIBRADOS	66
TABELA 5 – PARÂMETROS DOS FILTROS MORFOLÓGICO PROGRESIVO E RANSAC	66
TABELA 6 – NÚMERO DE PLANOS DE TELHADO E PONTOS DE VERIFICAÇÃO LiDAR	67
TABELA 7 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO PARA O EXPERIMENTO A	68
TABELA 8 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA O EXPERIMENTO A	69
TABELA 9 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE STUDENT	70
TABELA 10 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO PARA O EXPERIMENTO B	70
TABELA 11 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE <i>SHAPIRO-WILK</i> PARA O EXPERIMENTO B PARA A DIREÇÃO NORDESTE (NE) E SUDOESTE (SO)	71
TABELA 12 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO <i>t</i> DE STUDENT	73
TABELA 13 – SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 – CARACTERISTICAS DO SISTEMA LIDAR ALS60	53
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System*)

GPS – Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*)

IMU – Unidade de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit*)

INS – Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System*)

ISO – Orientação Integrada dos Sensores (*Integrated Sensors Orientation*)

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

LASER – *Light Amplified and Stimulated Emission Radar*

MATLAB – *Matrix Laboratory*

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

MDT – Modelo Digital do Terreno

MDE – Modelo Digital de Elevações

POEs – Parâmetros de orientação exterior

POIs – Parâmetros de orientação interior

POS – *Position Orientation System*

RANSAC – *Random Sample Consensus*

REMQ – Raiz do Erro Médio Quadrático

RPA – *Remotely Piloted Aircraft*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	ESTADO DA ARTE EM CALIBRAÇÃO DE SMM AEROTRANSPORTADO	18
1.3	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO	20
1.4	ESTRUTURA E CONTEÚDO DO TRABALHO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	CÂMERAS E SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS	22
2.2	SISTEMAS REFERENCIAIS ENVOLVIDOS EM UM SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO	24
2.3	INTEGRAÇÃO DO GNSS/INS PARA SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS	35
2.4	CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM	39
2.5	SISTEMA DE VARREDURA LASER AEROTRANSPORTADO	46
2.6	O ALGORITMO RANSAC	46
2.7	FILTRO MORFOLÓGICO PROGRESSIVO	46
2.8	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL	46
3	MATERIAIS E MÉTODO	52
3.1	MATERIAIS.....	52
3.2	MÉTODO	52
3.2.1	Extração automática de planos de telhados na nuvem de pontos LiDAR	55
3.2.2	Estratégia de correspondência ponto-a-plano	58
3.2.3	Determinação dos parâmetros de desalinhamento angular	59
3.2.4	Avaliação do desalinhamento angular determinado no referencial de mapeamento	62
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	76
	REFERÊNCIAS	78

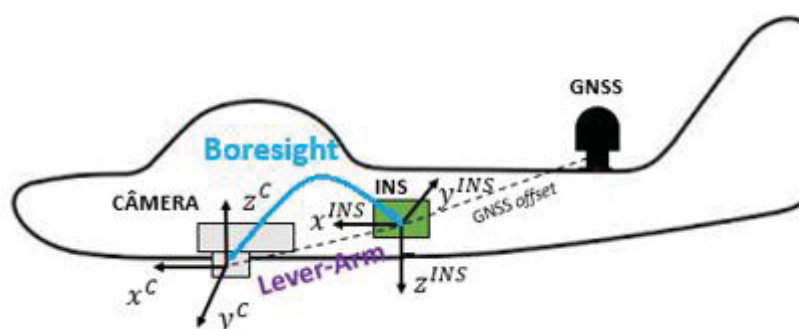
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O problema de calibração dos parâmetros de montagem de sistema fotogramétricos aerotransportados é tema central em aplicações fotogramétricas. Tradicionalmente, o georreferenciamento de imagens é feito de forma indireta utilizando como solução medidas observadas em imagens digitais, pontos de controle correspondentes e técnicas de ajustamento simultâneo de feixes de raios de luz perspectivos. Segundo Habib e Kersting (2010), a partir do advento do GNSS (*Global Navigation Sattelite System*) integrado ao INS (*Inertial Navigation System*), a orientação de imagens passou a ser feita de forma direta, onde as informações de posição e atitude da plataforma, fornecidas pela integração GNSS/INS, são utilizadas com maior peso no processo de fototriangulação de imagens, juntamente com os pontos de ligação. Com a técnica de georreferenciamento direto de imagens, a reconstrução do espaço objeto é obtida por processo de intersecção fotogramétrica usando os parâmetros de orientação exterior (POEs), fornecidos diretamente pela integração GNSS/INS, os parâmetros de orientação interior (POIs), determinados por um processo de calibração de câmeras, e os parâmetros de montagem do sistema, os quais são o desalinhamento entre o referencial do INS e o referencial da câmera (*Boresight*) e o deslocamento linear entre estes dois sensores (*lever-arm*), os quais podem ser obtidos por método de calibração. Além de vantagens econômicas, a orientação direta de sensores superou as limitações existentes no processo convencional de orientação de imagens, uma vez que pode ser empregado em superfícies com baixa textura, tais como regiões costeiras e áreas florestais.

Contudo, para se obter produtos cartográficos com acurácia e precisão posicional desejados é necessário realizar a calibração completa do sistema de mapeamento que envolve a determinação dos POIs, bem como a estimativa dos parâmetros de montagem do sistema. Os parâmetros de montagem são representados pelo braço do sistema (*lever-arm offset*), que corresponde ao deslocamento linear entre a origem do sistema referencial INS e o centro perspectivo (CP) da câmera, e os parâmetros de orientação relativa (*boresight angles*), que representam o desalinhamento angular entre o sistema referencial do INS e o sistema referencial fotogramétrico. A FIGURA 1 mostra a configuração de um sistema fotogramétrico aerotransportado com os parâmetros de montagem do sistema, os quais são o desalinhamento entre os eixos coordenados da câmera e do INS (*Boresight*), e o deslocamento entre a câmera e o INS (*Lever-Arm*).

FIGURA 1 – PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA



FONTE: O autor (2019)

As primeiras pesquisas envolvendo métodos de calibração de parâmetros de montagem de sistemas fotogramétricos aerotransportados passaram a ser efetivamente realizadas a partir da década de 1990 com a OEEPE (*European Organization for Experimental Photogrammetric Research*), a atual EuroSDR (*European Spatial Data Research*). Segundo HEIPKE e JACOBSEN (2002), a EuroSDR passou a promover experimentos com sensores diretamente orientados utilizando a técnica de georreferenciamento direto e orientação integrada de sensores (ISO), uma vez que a calibração do sistema passou a ser um pré-requisito para se obter informações precisas de posição e orientação a partir de informações oriundas do GNSS/INS.

Basicamente, duas abordagens de determinação dos parâmetros de montagem do sistema são encontradas na literatura, isto é, o método por etapas e o método simultâneo. O método por etapas consiste em determinar os parâmetros de montagem do sistema a partir das diferenças existentes entre as informações de posição e orientação do CP da câmera determinados diretamente pela solução GNSS/INS, e os POEs determinados indiretamente por fototriangulação de imagens (KERSTING, 2011). Já no método simultâneo, os parâmetros de montagem do sistema são estimados através de ajustamento por feixes de raios de luz perspectivos, utilizando os dados derivados da integração GNSS/INS (HEIPKE; JACOBSEN (2002); CRAMER; STALLMANN (2002); HONKAVAARA et al. (2003); SMITH et al. (2006), YUAN (2008) e ERCOLIN (2017)) e apoio de campo. Neste caso, tanto os parâmetros de montagem do sistema, quanto os POIs e os POEs de cada imagem são considerados como parâmetros no processo de ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos. De acordo com Habib e Schenk (2001), na técnica de orientação integrada de sensores (ISO), a estimativa dos POIs da câmera deve ser obtida com alto nível de precisão na calibração, uma vez que os parâmetros de montagem do sistema representam valores físicos do sensor, fornecidos pela integração GNSS/INS. Em

outras palavras, o processo físico de formação da imagem deve ser conhecido com alto grau de confiabilidade para evitar que erros sistemáticos, não modelados, afetem a qualidade do georreferenciamento direto.

1.2 ESTADO DA ARTE EM CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM

Como descrito anteriormente, os métodos de calibração dos parâmetros de montagem do sistema de mapeamento móvel podem ser agrupados em duas abordagens, isto é, abordagem simultânea e a abordagem por etapas. **Abordagem por etapas:** Nesta abordagem, os parâmetros de montagem do sistema são estimados comparando os POEs obtidos diretamente do INS com os parâmetros de orientação exterior da câmera de referência, ou seja, os POEs obtidos por um processo de fototriangulação de imagens (HABIB; KERSTING, 2010). CRAMER (1999), Skaloud (1999) CRAMER e STALLMANN (2002), CASELLA et al. (2004) utilizaram o método por etapas para calibração dos parâmetros de montagem do sistema. De acordo com os autores, o método por etapas fornece um valor de deslocamento linear e desalinhamento angular por imagem, sendo necessário calcular a média ponderada para estimar o valor dos parâmetros de montagem do sistema e seus respectivos desvios-padrão. GREJNER-BRZEZINKA (2001) empregou o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) para estimar um único valor de deslocamento linear e desalinhamento angular para o sistema de mapeamento móvel. Diversos pesquisadores foram atraídos pela solução simples e eficiente propiciado pelo método por etapas, como por exemplo, TOTH (1998), TOTH (1999), JACOBSEN (1999), YASTIKLI E JACOBSEN (2005), CASELLA ET AL. (2006), entre outros. De acordo com CRAMER E STALLMANN (2002), o método por etapas possui algumas desvantagens, tais como, as imagens localizadas nas extremidades dos alinhamentos de voo devem ser descartadas, devido à falta de confiabilidade dos POEs estimados nessas regiões do bloco fotogramétrico, tem demanda por campos de calibração com alta densificação de apoio de campo, como demonstrado em ERCOLIN et al. (2017), e a configuração de voo deve ser adequada para o processo de ajustamento em bloco. Além disso, a correlação existente entre os parâmetros de montagem do sistema, os POEs e os POIs da câmera é completamente ignorada nesta abordagem. **Abordagem simultânea:** Nesta abordagem, os parâmetros de montagem do sistema e os POIs são estimados com a inclusão de pontos de controle e pontos de ligação no processo de ajustamento de feixes de raios de luz perspectivos. PINTO E FORLANI (2002) estenderam o processo de fototriangulação de imagens adicionando nas equações de colinearidade, os parâmetros de montagem do

sistema. Apesar de ser moroso e de alto custo computacional, o método simultâneo é mais robusto que o método por etapas, uma vez que procura minimizar a correlação existente entre os POEs e os POIs. A determinação simultânea dos parâmetros supracitados evita efeitos sistemáticos no produto fotogramétrico. Esta abordagem também pode ser aplicada com menos critério de rigidez na configuração de voo e a dependência entre as observações é ignorada no processo de ajustamento. Outros trabalhos que empregam a abordagem simultânea são: WEGMANN (2002); HEIPKE et al. (2002); CRAMER e STALLMANN (2002); HONKAVAARA et al. (2003); HONKAVAARA (2004); SMITH et al. (2006); YUAN (2008); THOM e RABOT (2016).

Atualmente, com a redução de custos dos equipamentos e a facilidade na aquisição de dados espaciais, o recobrimento da superfície física da Terra tem sido amplamente realizado por sistemas LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Esta estratégia de recobrimentos aéreos abriu novas possibilidades no emprego de apoio de campo derivado de nuvens de pontos LiDAR em algumas das recentes pesquisas em orientação integrada de sensores, como pode ser visto em Kim et al. (2006), MITISHITA et al. (2008), GNEENISS (2013), MITISHITA et al. (2017), COSTA et al. (2017), COSTA (2019). Os modelos de correspondências são baseados em abordagens ponto-a-ponto podendo ser as primitivas extraídas do centroide de telhados, pela intersecção de um grupo de três telhados adjacentes ou pela intersecção de cantos opostos de telhados. Por exemplo, COSTA (2019) utilizou nuvem LiDAR aerotransportada para extrair pontos de apoio e estimar os parâmetros de montagem de um sistema fotogramétrico aerotransportado. O autor encontrou valores mais confiáveis com o emprego do método simultâneo usando sub-blocos de imagens por sentido de voo. A TABELA 1 mostra um resumo das abordagens de calibração dos parâmetros de montagem do sistema encontrados na literatura.

TABELA 1 – MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA

Autores	Tipo de Aeronave	Método de Calibração	Abordagem de correspondência	Apoio de campo
YUAN (2008)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
PINTO e FORLANI (2002)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
HONKAVAARA et al. (2003)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
HEIPKE et al. (2002)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
SMITH et al. (2006)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
CRAMER e STALLMANN (2002)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
ZHOU e REICHLE (2010)	RPAS Multi-Rotor	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
CRAMER (2001)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
THOM e RABOT (2016)	RPAS Multi-Rotor	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
YASTIKLI e JACOBSEN (2005)	Convencional	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS

HABIB et al. (2018a)	RPAS Multi-Rotor	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
HABIB et al. (2018b)	RPAS Multi-Rotor	Simultâneo	ponto-a-ponto	GNSS
COSTA (2019)	Convencional	Por Etapas/Simultâneo	ponto-a-ponto	LiDAR
CRAMER (1999)	Convencional	Por Etapas	ponto-a-ponto	GNSS
CRAMER e STALLMANN (2001)	Convencional	Por Etapas	ponto-a-ponto	GNSS
CASELLA e STALLMANN (2006)	Convencional	Por Etapas	ponto-a-ponto	GNSS
GREJNER e BRZEZINSKA (2001)	Convencional	Por Etapas	ponto-a-ponto	GNSS
GABRLIK et al. (2018)	RPAS Multi-Rotor	Por Etapas	ponto-a-ponto	GNSS

FORNTE: O autor (2019).

Como pode ser observado na TABELA 1 o modelo de correspondência utilizado na estimativa dos parâmetros de montagem do sistema é baseado na abordagem ponto-a-ponto. Esta estratégia exige a correspondência exata entre pontos conjugados, tornando o processo complexo, uma vez que a coleta dos pontos deve ser feita minuciosamente, porém, nas abordagens em que os pontos de apoio são extraídos da nuvem LiDAR não se pode garantir o estabelecimento de correspondências exatas, devido à natureza irregular e discreta dos dados LiDAR. Por outro lado, quando o ponto de apoio LiDAR é extraído pela interseção de no mínimo três planos de telhados adjacentes é necessário acrescentar as tarefas de segmentação e intersecção de planos. Guiado pelos trabalhos relacionados, três aspectos principais são discutidos neste trabalho:

- a) O desenvolvimento de um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-plano que mapeia um ponto na imagem digital em seu plano correspondente na nuvem de pontos LiDAR;
- b) Inclusão de ponderação nas observações baseado no modelo teórico da equação do plano; e
- c) Emprego de planos de apoio de campo extraídos de dados LiDAR para estimativa dos parâmetros de montagem do sistema usando o método simultâneo de calibração.

1.3 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

Este trabalho tem como objetivo geral investigar um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-plano para calibração dos parâmetros de desalinhamento angular de um sistema fotogramétrico aerotransportado usando superfícies planas como apoio de campo. Os objetivos específicos a serem perseguidos neste trabalho são:

- a) Desenvolver um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-plano para calibração dos ângulos de desalinhamento entre o sistema referencial do INS e o sistema referencial fotogramétrico;
- b) Estudar a ponderação das observações baseado no modelo teórico da equação do plano;
- c) Verificar o potencial do emprego de superfícies planas derivadas dos dados LiDAR aerotransportado como apoio de campo no método ISO.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura proposta consiste de cinco capítulos. No Capítulo 1 são apresentadas a Introdução, o Estado da Arte sobre calibração dos parâmetros de montagem, os Objetivos a serem atingidos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos utilizados no presente trabalho. No Capítulo 3 são descritos os recursos utilizados e a metodologia proposta. No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos experimentos realizados, juntamente com as devidas discussões. Para finalizar, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e as recomendações para trabalhos futuros.

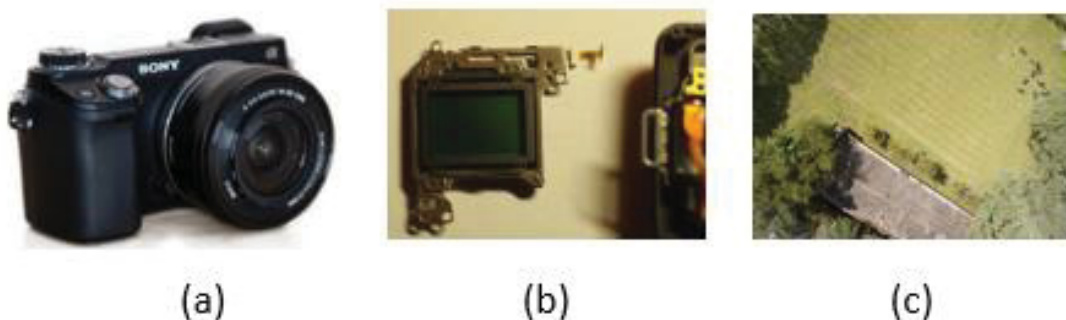
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos necessários para compreensão do problema que será abordado neste trabalho. Primeiramente, são apresentados os conceitos sobre câmeras digitais e sistemas referenciais usados na Fotogrametria, bem como o princípio de funcionamento do sistema LiDAR aerotransportado. Em seguida são discutidos os principais métodos de calibração dos parâmetros de montagem de um sistema fotogramétrico aerotransportado, assim como os critérios de avaliação da acurácia posicional de um produto fotogramétrico.

2.1 CÂMERAS E SISTEMAS FOTOGRAMÉTRICOS DIGITAIS

De acordo com Jacobsen (2011), as câmeras digitais empregadas em serviços aerofotogramétricos podem ser classificadas em duas categorias: 1) Câmeras de quadro; 2) Câmeras de varredura linear. A FIGURA 2 (a) mostra um exemplo de câmera de quadro que pode ser adquirida por um preço médio de dois mil reais, com sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) acoplado (b) de dimensão $23,50 \times 15,60 \text{ mm}^2$, com capacidade em obter imagens aéreas (c) com um GSD (*Ground Sample Distance*) de aproximadamente 3,5 cm à uma altura de voo de 120 metros.

FIGURA 2 – EXEMPLO DE CÂMERA DIGITAL (a), SENSOR CMOS (b), E IMAGEM DIGITAL AÉREA (c)



FONTE: O autor (2018)

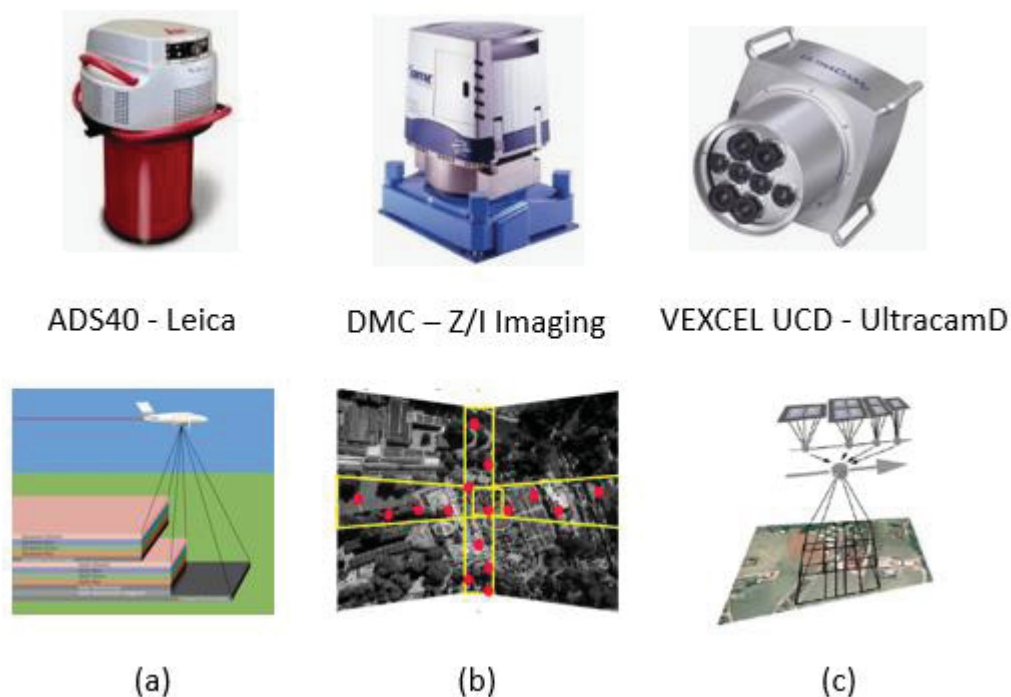
O tamanho físico de um sensor de imageamento CCD (*Charge Coupled Device*) ou CMOS é um elemento importante a ser considerado na determinação do tamanho do pixel na imagem. Suas especificações são determinadas em função da área ativa de imageamento expressas em polegadas ou milímetros. Para calcular o tamanho do pixel (Tp) na imagem é necessário conhecer o número total de colunas (NTC) e o número total de linhas (NTL) da imagem, assim como o tamanho físico do sensor. Por exemplo, para um

sensor com padrão de 2/3" com NTC igual a 2560 pixels, e NTL igual a 1920 pixels, faz-se:

$$T_p = \frac{8.8\text{mm}}{2560 \text{ pixels}} = \frac{6.6\text{mm}}{1920 \text{ pixels}} = 0.0034\text{mm/pixels} \quad (1)$$

Já na FIGURA 3 é apresentado alguns exemplos de câmeras fabricadas originalmente com propósitos fotogramétricos, assim como o respectivo modo de aquisição.

FIGURA 3 – CÂMERA DIGITAL ADS40 (a), CÂMERA DIGITAL DMC (b), E CÂMERA DIGITAL VEXCEL UCD(c)



FONTE: Adaptado de Reulke (2003)

Os três exemplos de câmeras aerofotogramétricas apresentadas na FIGURA 3 foram utilizadas em projeto da EuroSDR no ano de 2007 com propósitos de calibração dos parâmetros de orientação interior (POIs), com a análise dos resultados podendo ser consultada em CRAMER (2007).

A câmera ADS40 (*Airborne Digital Sensor* – ver FIG. 3a) é um exemplo de câmera fotogramétrica digital de varredura (*pushbroom*), seu princípio de aquisição de imagens é baseado no sistema de varredura tri-linear, com visadas nas posições anterior, nadir e posterior. Na FIGURA 3b é mostrado uma câmera DMC (*Digital Mapping Camera*), cujo sensor é baseado em um arranjo matricial de quatro câmeras pancromáticas centrais e

quatro câmeras RGB e infravermelho próximo (NIR) nas extremidades. A FIGURA 3c apresenta uma câmera VEXCEL UCD (UltraCamD), que de forma análoga à câmera DMC, também possui oito câmeras, porém, quatro câmeras pancromáticas ficam alinhadas na direção de voo e quatro câmeras RGB e NIR estão dispostas nas extremidades do sistema.

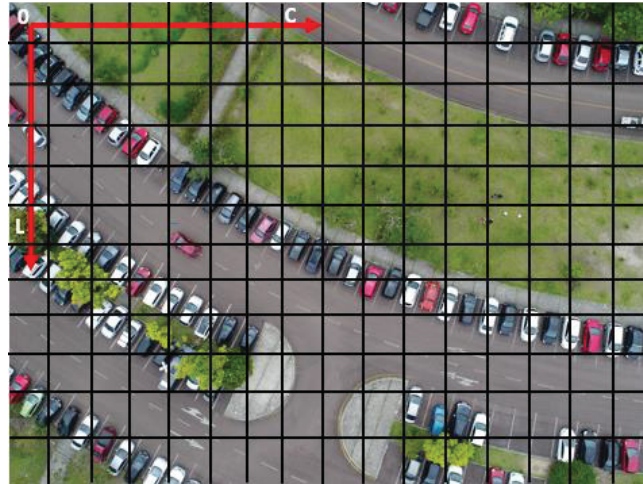
Outro exemplo de câmera aérea digital de grande formato é a UltracamXp, modelo utilizado nesta pesquisa. Esta câmera foi desenvolvida pela VEXCEL Imaging GmbH, Graz, Áustria, disponibilizada pela *Microsoft Photogrammetry*, sob a direção da empresa *Microsoft Corp.*, Redmond, EUA (GRUBER, 2007).

Com o design similar aos modelos anteriores, a UltracamX e a UltracamD, o modelo UltracamXp possui quatro sensores pancromáticos, com nove CCDs, e quatro sensores multiespectrais, com quatro CCDs (SCHOLZ; GRUBER, 2009). Os sensores pancromáticos ficam alinhados em um plano focal, que permite a geração de imagens sintéticas a partir da combinação de sub imagens em relação a um sensor de referência denominado de sensor mestre, que define um sistema de coordenadas para gerar a imagem sintética de (11310 x 17310) pixels, sendo os outros sensores acionados de forma sincronizada e sintópica (mesma posição) em relação ao sensor mestre. Os sensores multiespectrais (RGB e NIR) também geram imagens sintéticas (LEBERL; GRUBER, 2003).

2.2 SISTEMAS REFERENCIAIS ENVOLVIDOS EM UM SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO

Uma imagem digital nada mais é do que um conjunto de elementos de imagem espacialmente ordenados em uma matriz bidimensionais C (Coluna) e L (Linha), sendo que a cada elemento de imagem (pixel) é associado um tom de cinza. O número máximo de valores de cinza que pode ocorrer na imagem é 2^n bits, que corresponde aos valores inteiros armazenados em “palavras” de n bits (dígitos binários). No caso de imagens coloridas existe uma combinação das componentes R (*Red*), G (*Green*) e B (*Blue*). A FIGURA 4 ilustra os elementos espacialmente ordenados em arranjo matricial de uma imagem digital, com os eixos 0C e 0L.

FIGURA 4 – SISTEMA REFERENCIAL DIGITAL



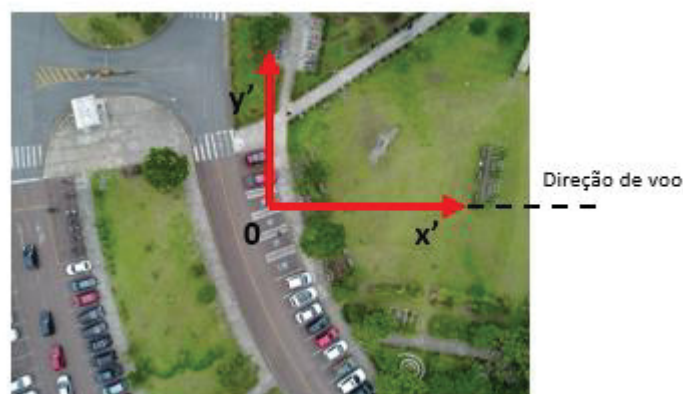
FONTE: O autor (2018).

Como mostrado na Figura 4, o sistema referencial digital é usualmente definido na forma que segue:

- Origem (0): a origem do sistema é o canto superior esquerdo da imagem;
- Eixo 0C: direção horizontal e sentido positivo para a direita;
- Eixo 0L: rotacionado 90° graus em relação ao eixo 0C, sentido horário (sistema levógiro);
- C, L: coluna e linha, respectivamente.

Considerando que 0 (centro da imagem) é a origem do sistema referencial com origem no centro da imagem, o eixo $0x'$ é orientado positivamente na direção do sentido de deslocamento da plataforma, o eixo $0y'$ é perpendicular ao eixo $0x'$, tornando o sistema dextrógiro. A FIGURA 5 mostra o sistema referencial com origem no centro da fotografia.

FIGURA 5 – SISTEMA REFERENCIAL COM ORIGEM NO CENTRO DA IMAGEM

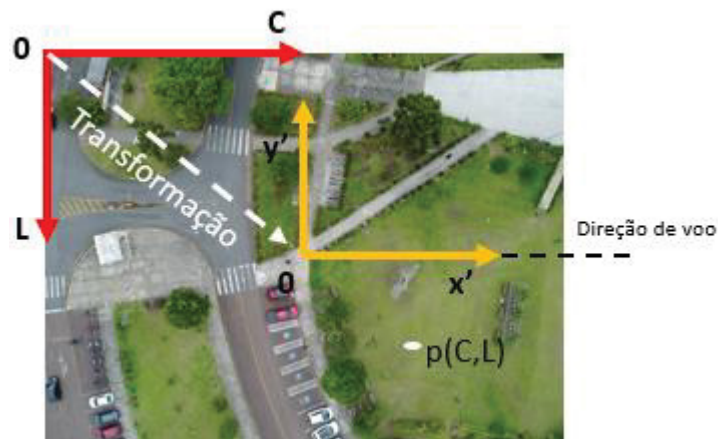


FONTE: O autor (2018).

Para transformar as coordenadas dos pixels $p(C, L)$ observados na imagem digital para o sistema referencial com origem no centro da imagem (x', y'), como mostra a FIGURA 6, é necessário utilizar a seguinte transformação matemática, a saber:

$$\begin{aligned} x' &= \left(C - \frac{NTC-1}{2} \right) Tp \\ y' &= - \left(L - \frac{NTL-1}{2} \right) Tp \end{aligned} \quad (2)$$

FIGURA 6 – ESQUEMA DE TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA REFERENCIAL DIGITAL PARA O SISTEMA REFERENCIAL COM ORIGEM NO CENTRO DA IMAGEM.

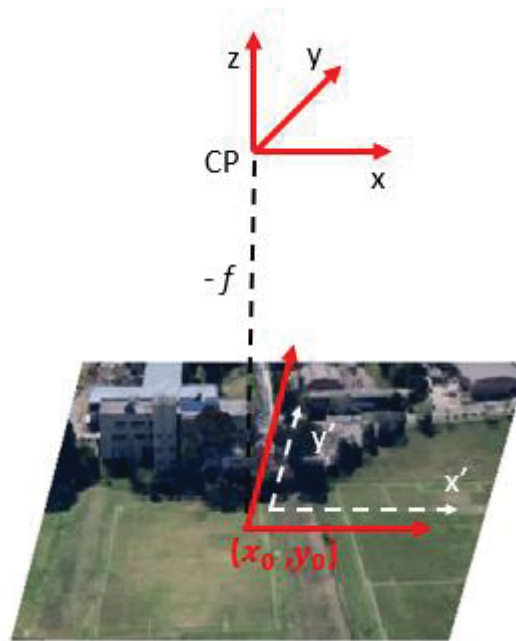


FONTE: O autor (2019).

Na Equação (3), a transformação entre os sistemas referencial digital e com origem no centro da imagem é feito baseado em duas translações $(\frac{NTC}{2}, \frac{NTL}{2})$, um fator de escala (Tp) e uma reflexão no eixo L para y' . A operação de reflexão é facilmente aplicada multiplicando y' por -1.

Por definição, o referencial fotogramétrico (x', y'), é um sistema de coordenadas cartesiano tridimensional dextrogiro, com origem no CP da câmera. A orientação dos eixos CPx e CPy é paralela aos eixos $0x'$ e $0y'$ do referencial com origem no centro da imagem, respectivamente, enquanto o eixo CPz coincide com o eixo óptico da câmera, sentido positivo para o zênite e negativo para o nadir, como mostra a FIGURA 7.

FIGURA 7 - SISTEMA REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO.



FONTE: O autor (2018).

Na FIGURA 7, como a coordenada z é constante e igual à distância focal da câmera (f), utiliza-se um referencial plano cuja origem é o ponto principal de autocolimação (pp). O pp é o ponto de intersecção formado pela projeção ortogonal do CP da câmera no plano da imagem, onde chega um raio de luz que entra perpendicular ao sistema de lentes da câmera, com coordenadas $(x_0, y_0, 0)$. Para fins de simplificação matemática, o CP da câmera é representado por uma abstração pontual do sistema complexo de lentes, servindo apenas como uma referência para o sistema referencial fotogramétrico.

A transformação de um ponto qualquer $p(x', y')$ no sistema com origem no centro da imagem para o sistema referencial fotogramétrico é feito através das seguintes equações, a saber:

$$x = x' - x_0 \quad (3)$$

$$y = y' - y_0 \quad (4)$$

sendo x e y as coordenadas de um ponto no sistema referencial fotogramétrico.

Devido às falhas existentes no processo de fabricação do sistema de lentes são inseridos dois tipos de distorções nas imagens, isto é, a distorção radial e a distorção descentrada. A distorção radial é produzida em função da impossibilidade de se construir

lentes perfeitamente esféricas, enquanto a distorção descentrada, composta das componentes radial e tangencial, é provocada pela incapacidade do fabricante alinhar perfeitamente os eixos ópticos do conjunto das lentes que compõem um sistema de lentes. As equações polinomiais que modelam a distorção radial, decomposta nas componentes em x', y' são as que seguem (BROWN, 1971):

$$\partial x = (x' - x_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] \quad (5)$$

$$\partial y = (y' - y_0)[k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6] \quad (6)$$

sendo k_1, k_2, k_3 os coeficientes de distorção radial simétrica, x', y' as coordenadas do ponto no espaço imagem não corrigidas da distorção radial da lente, $r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$, e x_0, y_0 as coordenadas do ponto principal com relação ao centro geométrico da imagem.

Já as equações polinomiais que modelam a resultante da componente radial e da componente tangencial, da distorção descentrada, decompostas nas componentes em x' e em y' são escritas da seguinte forma, a saber:

$$\delta_{dx} = P_1(r^2 + 2(x' - x_0)^2) + 2P_2(x' - x_0)(y' - y_0) \quad (7)$$

$$\delta_{dy} = P_2(r^2 + 2(y' - y_0)^2) + 2P_1(x' - x_0)(y' - y_0) \quad (8)$$

sendo P_1, P_2 os coeficientes de distorção descentrada. Para maiores detalhes, sugere-se Brown (1971) e Fryer e Brown (1986).

Também é importante lembrar que para câmeras digitais devem ser considerados os parâmetros de afinidade (A, B) que representam um fator de escala e um fator de não ortogonalidade entre os eixos do sistema referencial digital, principalmente para câmeras de pequeno formato, também chamadas de *off-the-shelf*. Conforme Moniwa (1972), este efeito pode ser parametrizado da seguinte forma, a saber:

$$d_x = -A(x' - x_0) + B(y' - y_0) \quad (9)$$

$$d_y = A(y' - y_0) \quad (10)$$

A correção das coordenadas de um ponto no sistema referencial com origem no centro da imagem pode ser feita da seguinte forma:

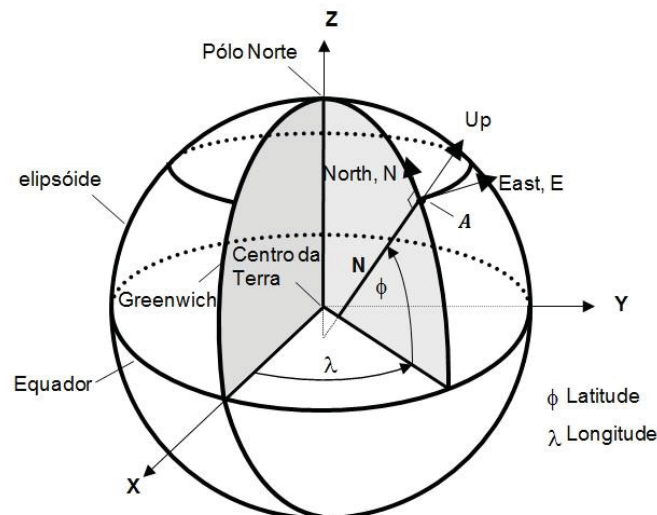
$$x'_c = x - (\partial x + \delta_{dx} + \mathfrak{d}_x) \quad (11)$$

$$y'_c = y - (\partial y + \delta_{dy} + \mathfrak{d}_y) \quad (12)$$

sendo x'_c , y'_c as fotocoordenadas do ponto p no sistema referencial fotogramétrico, corrigidas das distorções das lentes.

Quando sensores INS são embarcados no sistema fotogramétrico aerotransportado é necessário considerar o sistema referencial terrestre, que é estacionário e independente do tempo. O sistema referencial terrestre adotado aqui é conhecido como sistema referencial Geocêntrico, cuja origem é o centro da Terra (ECEF) com o plano X-Y coincidindo com a linha do Equador, onde o eixo X faz intersecção, na direção positiva, com o Meridiano de Greenwich, o eixo Z é paralelo ao eixo de rotação da Terra com sentido positivo na direção ao pólo Norte, o eixo Y forma o plano Equatorial e é perpendicular ao eixo X, tornando o sistema dextrógiro. A FIGURA 8 mostra o sistema referencial Geocêntrico.

FIGURA 8 – SISTEMA REFERENCIAL GEOCÊNTRICO.

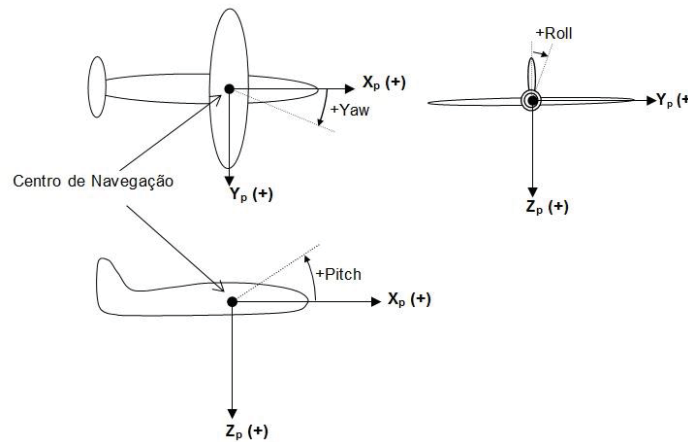


FONTE: O autor (2018).

Qualquer ponto (A) na superfície de referência deve ser representado em coordenadas geocêntricas (X_p , Y_p , Z_p) ou, de forma alternativa, em coordenadas geográficas Latitude e Longitude (na superfície do elipsóide). Considerando uma plataforma capaz de embarcar sensores de imageamento, como por exemplo uma plataforma aérea, seu sistema referencial de coordenadas é definido em relação ao seu centro de navegação (sistema de navegação inercial) que é fixado na estrutura da plataforma. Os eixos do sistema da plataforma são definidos como: eixo X_p positivo ao longo da direção de deslocamento da plataforma, ao longo do movimento de rolagem (*roll*); eixo Y_p positivo na direção de estibordo (asa), ao longo do movimento de arfagem (*pitch*) tal que o plano $X_p Y_p$ é horizontal quando a plataforma está estabilizada; e o eixo Z_p positivo na direção do nadir,

ao longo do movimento de deriva (*yaw*). A FIGURA 9 mostra os movimentos da plataforma aplicadas sobre o sistema referencial North-East-Down (NED).

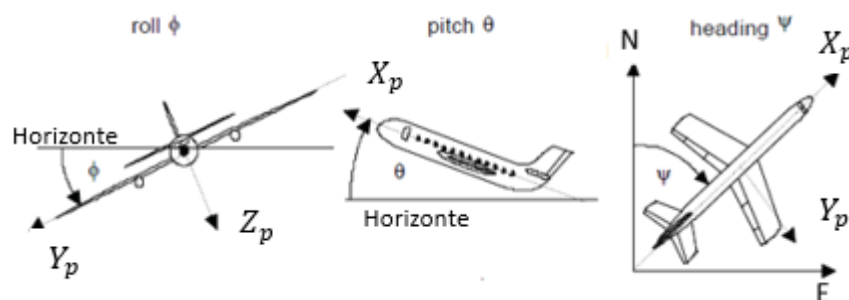
FIGURA 9 – ROTAÇÕES DA PLATAFORMA SOBRE O SISTEMA REFERENCIAL NED.



FONTE: O autor (2018).

Desta forma, o sistema referencial NED é definido da seguinte forma: o eixo Z_p da plataforma está alinhado com o nadir (D) do ponto e o plano North-East é paralelo ao plano tangente ao elipsóide na interseção com D, como mostra a FIGURA 10. Os parâmetros de rotação 3D sobre o eixo do centro de massa da plataforma são conhecidos como *heading* (ou *yaw*), *pitch* e *roll*.

FIGURA 10 – SISTEMA REFERENCIAL DA PLATAFORMA E NED.



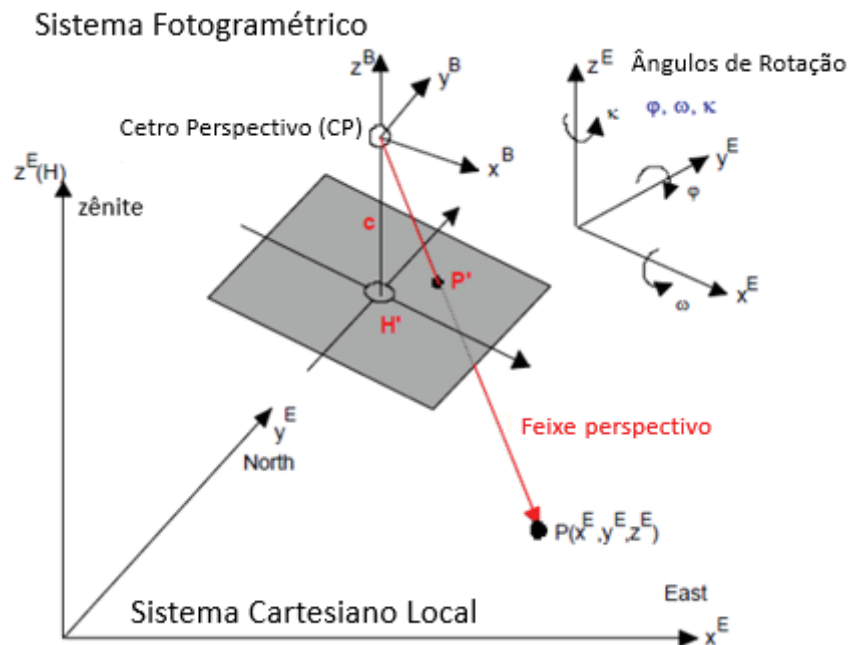
FONTE: Adaptado de Bäumker e Heimes, (2002).

Desta forma, o sistema referencial NED é definido da seguinte forma: o eixo Z_p da plataforma está alinhado com o nadir (D) do ponto e o plano North-East é paralelo ao plano tangente ao elipsóide na interseção com D, como mostra a FIGURA 10. Os parâmetros de

rotação 3D sobre o eixo do centro de massa da plataforma são conhecidos como *heading* (ou *yaw*), *pitch* e *roll*.

O sistema de coordenadas utilizados nos INS (*roll* Φ , *pitch* θ e *heading* ψ), apresentados na FIGURA 10, são definidos de acordo com o movimento da aeronave. Os ângulos de atitude obtidos pelo INS (Φ , θ , ψ) não coincidem com o sistema de coordenadas fotogramétricos, e com os ângulos de atitude (ω , φ , κ). Conforme mostra a FIGURA 11, no sistema fotogramétrico tem-se o Centro Perspectivo (CP), a distância focal “c”, e o Ponto Principal (H'), que é a projeção do CP no plano da imagem. Ao invés de utilizar o sistema de coordenadas de navegação, na fotogrametria utiliza-se o sistema de coordenadas local. Segundo Bäumker e Heimes (2002), além das diferentes orientações dos sistemas de coordenadas, os ângulos de rotação (ω , φ , κ) podem ser definidos de formas distintas (BLUH e PATB).

FIGURA 11 – DEFINIÇÕES DOS SISTEMAS DE COORDENADAS E DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO UTILIZADOS NA FOTOGAMETRIA: SISTEMA FOTOGAMÉTRICO, SISTEMA DE COORDENADAS GEOCÊNTRICAS, E ÂNGULOS DE ROTAÇÃO ω, φ, κ .

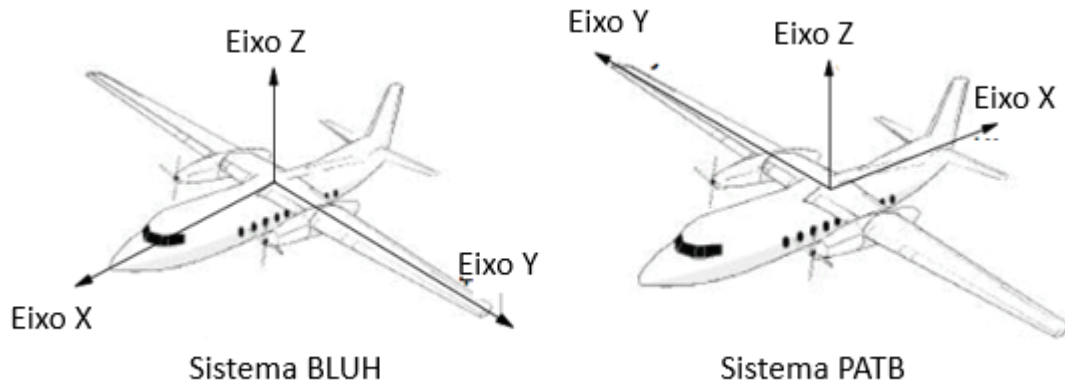


FONTE: Adaptado de Bäumker e Heimes, (2002).

As diferentes orientações do sistema de coordenadas dependerão da maneira como o INS foi montado na plataforma, sendo o sistema BLUH desenvolvido pela Universidade de Hannover (JACOBSEN, 1996), e o sistema PATB desenvolvido pela Universidade de

Stuttgart (INPHO GmbH, 1999). A FIGURA 12 mostra a diferença de orientação dos dois sistemas.

FIGURA 12 – DEFINIÇÃO DE ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DA IMAGEM PARA O SISTEMA BLUH (ESQUERDA) E PATB (DIREITA)



FONTE: Adaptado de Bäumker e Heimes, (2002).

Para estas transformações do sistema de navegação fornecido pelo INS, para o sistema fotogramétrico, utilizando tanto o sistema BLUH quanto o PATB, e seguindo a metodologia adotada por Bäumker e Heimes (2002), tem-se as seguintes matrizes de rotação a saber:

$$C_{E\ BLUH}^B = R_z(\kappa) * R_x(\omega) * R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C_{E\ PATB}^B = R_x(\omega) * R_y(\varphi) * R_z(\kappa) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Com isso, tem-se as seguintes matrizes de rotação para os sistemas BLUH e PATB a saber:

$$C_{E\ BLUH}^B = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi + \sin \kappa \sin \omega \sin \varphi & \sin \kappa \cos \omega & -\cos \kappa \sin \varphi + \sin \kappa \sin \omega \cos \varphi \\ -\sin \kappa \cos \varphi + \cos \kappa \sin \omega \sin \varphi & \cos \kappa \cos \omega & \sin \kappa \sin \varphi + \cos \kappa \sin \omega \cos \varphi \\ \cos \omega \sin \varphi & -\sin \omega & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C_{E\ PATB}^B = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\sin \kappa \cos \varphi & \sin \omega \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (16)$$

Conhecendo os ângulos fornecido pelo INS, a transformação pode ser calculada utilizando os elementos da matriz $C_{E\ BLUH}^B$, para o sistema BLUH, e os elementos da matriz $C_{E\ PATB}^B$, para o sistema PATB. Na TABELA 2 estão apresentados os resultados:

TABELA 2 – CALCULO DOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO ω, φ, κ UTILIZANDO AS MATRIZES DE ROTAÇÃO BLUH E PATB

Sistema BLUH	Sistema PATB
$\varphi = \arctg \frac{C_{31}}{C_{33}}$	$\varphi = \arcsen C_{13} = \arctg \frac{C_{13}}{\sqrt{C_{23}^2 + C_{33}^2}}$
$\omega = \arcsen -C_{32} = \arctg \frac{-C_{32}}{\sqrt{C_{12}^2 + C_{22}^2}}$	$\omega = \arctg \frac{-C_{23}}{C_{33}}$
$\kappa = \arctg \frac{C_{12}}{C_{22}}$	$\kappa = \arctg \frac{-C_{12}}{C_{11}}$

FONTE: Bäumker e Heimes, (2002).

Ainda para converter os ângulos do sistema INS (roll, pitch, yaw) para os ângulos de atitude da câmera, ω, φ, κ , devem ser consideradas diferentes sistemas de coordenadas e rotações. Devido à diferença de orientação dos eixos dos sistemas de coordenadas do INS e da câmara duas matrizes de rotação adicionais são necessárias para obter sistemas de orientação equivalentes, a saber: (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

$$T_{b\ BLUH}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad T_{b\ PATB}^B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad T_n^E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Onde as matrizes $T_{b\ BLUH}^B$ e $T_{b\ PATB}^B$ são usadas para transformar do sistema INS para o sistema fotogramétrico e vice-versa. A matriz T_n^E é usada para transformar do sistema de navegação (sistema local) para o sistema de referencial de mapeamento e vice-versa. No caso de não se utilizar de um sistema de coordenadas local para o sistema de referencial de mapeamento, utiliza-se uma matriz de rotação adicional para compensar os efeitos da curvatura terrestre e desvio de meridiano (BÄUMKER; HEIMES, 2002).

$$C_n^{n'} = \begin{bmatrix} 1 & e_v & -e_e \\ -e_v & 1 & e_n \\ e_e & -e_n & 1 \end{bmatrix} \text{ em que } \begin{aligned} e_n &= -(\lambda_i - \lambda_o) \cos \varphi \\ e_e &= (\varphi_i - \varphi_o) \\ e_v &= (\lambda_i - \lambda_o^{UTM}) \sin \varphi \end{aligned} \quad (18)$$

Sendo λ_i e φ_i as coordenadas geográficas, λ_o e φ_o as coordenadas geográficas da origem do sistema do plano (*Universal Transversa de Mercator* - UTM), e λ_o^{UTM} o meridiano central do sistema UTM.

Portanto, para cada imagem (i) as seguintes matrizes devem ser calculadas para os ângulos de atitude (roll, pitch, yaw), as coordenadas geográficas (λ_i e φ_i) e as coordenadas geográficas da origem do sistema plano (λ_o e φ_o).

$$C_b^{n_i} = f(\phi_i, \theta_i, \psi_i) \quad C_e^{n_o} = f(\varphi_o, \lambda_o) \quad C_e^{n_i} = f(\varphi_i, \lambda_i) \quad (19)$$

$$C_{n_o}^{n'} = f(\varphi_i, \lambda_i, \varphi_o, \lambda_o, \lambda_o^{UTM}) \quad (20)$$

Portanto, tem-se cinco transformações a saber:

1. $C_b^e = (C_e^{n_i})^T \cdot C_b^{n_i}$ Transforma do *b* – System para o *e* – System
2. $C_b^{n_o} = C_e^{n_o} \cdot C_b^e$ Transforma do *b* – System para o *n_o* – System
3. $C_b^{n'} = C_{n_o}^{n'} \cdot C_b^{n_o}$ Transforma do *b* – System para o *n* – System
4. $T_n^B = T_b^B \cdot (C_b^{n'})^T$ Transforma do *n'* – System para o *B* – System
5. $C_E^B = T_n^B \cdot (T_n^E)^T$ Transforma do *E* – System para *B* – System

Combinando todas as matrizes de transformação, tem-se a seguinte equação a saber:

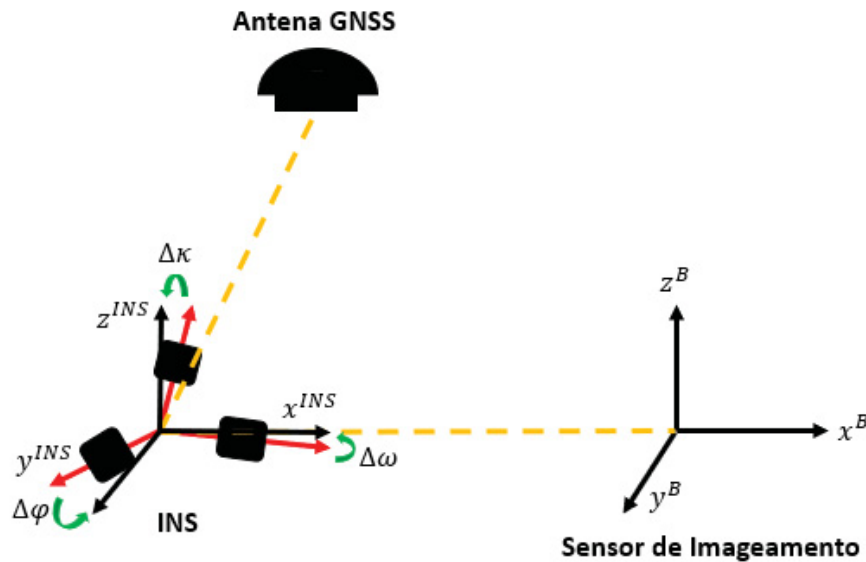
$$C_E^B = T_b^B \cdot (C_{n_o}^{n'} \cdot C_e^{n_o} \cdot (C_e^{n_i})^T \cdot C_b^{n_i})^T \cdot (T_n^E)^T \quad (21)$$

Com a equação (21), calcula-se os ângulos de atitude de cada imagem (ω , ϕ , κ), podendo também serem calculados utilizando a TABELA 2, com base nos elementos das matrizes de rotação das equações (15) e (16).

Além dos sistemas de coordenadas do INS e da câmara terem definições diferentes, os eixos destes sistemas de coordenadas devem ser montados aproximadamente paralelos um ao outro. Aplicações de alta precisão requer um tratamento especial entre o

desalinhamento dos eixos coordenados do INS e os eixos coordenados fotogramétricos (BÄUMKER; HEIMES, 2002). A FIGURA 13 apresenta o desalinhamento $\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$.

FIGURA 13 – DESALINHAMENTO DOS SISTEMAS



FONTE: O autor (2019)

Normalmente, o desalinhamento entre os eixos ($\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\kappa$) são valores pequenos, com isso, pode-se utilizar a seguinte matriz de rotação a saber:

$$T_b^{b*} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\kappa & -\Delta\varphi \\ -\Delta\kappa & 1 & \Delta\omega \\ \Delta\varphi & -\Delta\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Adicionando a equação (20) a equação (19), tem-se a seguinte equação a saber:

$$C_E^B = T_b^B \cdot \left(C_{n_o}^{n_i} \cdot C_e^{n_o} \cdot (C_e^{n_i})^T \cdot C_b^{n_i} \cdot (T_b^{b*})^T \right)^T \cdot (T_n^E)^T \quad (23)$$

2.3. INTEGRAÇÃO DO GNSS/INS PARA SISTEMAS FOTOGRAFÉTRICOS

Na década de 1970, nos Estados Unidos, surgiu a proposta do NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*), sistema que revolucionou praticamente todas as atividades que dependiam da determinação de posições. Em paralelo e de forma independente, na antiga URSS, foi desenvolvido o GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*),

um sistema muito similar ao NAVSTAR-GPS. Como o governo norte americano não concordou em outras nações participarem no desenvolvimento de seu sistema, a União Europeia criou no final da década de 90 o GALILEU (MONICO, 2008).

Além destes sistemas, ainda existem algumas expansões do GPS como o WAAS (*Wide Area Augmentation Overlay System*) nos Estados Unidos, o MSAS no Japão, entre outros, sendo que esses sistemas têm sido chamados de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), nome concebido em 1991, durante a 10ª Conferência de Navegação Aérea.

Atualmente, uma antena GNSS que pode ser facilmente adquirida ao custo de cem reais, reconhece os sinais de única frequência (L1) dos sistemas GPS e GLONASS, que identifica o código C/A (*Coarse Acquisition*) e o utiliza para o cálculo da observável pseudo-distância, o que fornece acurácia posicional de 5 a 10 metros. Sendo que na prática, este valor costuma ser menor com a integração GNSS/INS.

No Segmento Espacial tem-se as características dos sinais GNSS, particularmente do GPS, sendo o do GLONASS similar, com três tipos de sinais envolvidos:

1. As portadoras (L1, L2 e L5);
2. Os códigos (C/A, L2C, L5C e P(Y));
3. Os dados (navegação, relógio e outros).

As portadoras são geradas simultaneamente, permitindo aos usuários corrigir grande parte dos efeitos ionosféricos. Os PRNs (*Pseudo-Random Noise*) são as identificações de cada satélite, e variam de 1 a 37. Esta identificação é obtida a partir do código C/A que é utilizado para o cálculo da observável pseudo-distância. Os códigos que formam o PRN são modulados em fase sobre as portadoras L1 e L2. Essa técnica permite realizar medidas de distâncias, a partir da medida do tempo de propagação da modulação. Um PRN é uma sequência binária que parece ter característica aleatória. Como é gerado por um algoritmo, pode ser univocamente identificado. Trata-se basicamente dos códigos C/A e P.

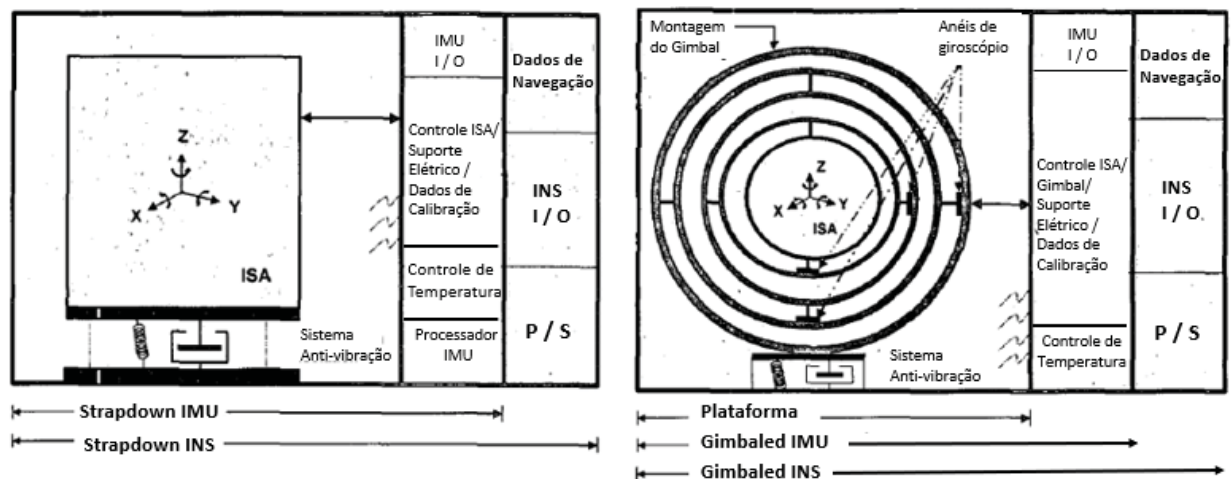
Cada satélite transmite um código C/A diferente, como este código faz parte de uma família de códigos (*Gold Codes*) que possuem baixa correlação entre seus membros, o receptor GPS consegue identificar rapidamente o satélite rastreado, ou seja, o PRN deste satélite. Sendo este código modulado apenas sobre a onda portadora L1, ele é utilizado na integração GNSS/INS para obter as informações de posição.

Em pesquisa produzida pelo IEEE, foram listados os sistemas inerciais com as principais definições que contemplam desde a montagem da plataforma do sensor inercial (ISA), a unidade de medição inercial (IMU), a unidade de referência inercial (IRU) para medições de atitude, os quais formam o sistema de navegação inercial (INS) como solução de navegação.

Um Sistema de Navegação Inercial (*INS - Inertial Navigation System*), também conhecido na literatura como Sistema de Referência de Atitude e Direção (AHRS), é um sistema composto por uma unidade de medição inercial (*Inertial Measurement Unit – IMU*) e um módulo de navegação. O INS estima os ângulos da aeronave em relação a um sistema local de coordenadas, sendo necessário um sistema de nivelamento, geralmente feito com acelerômetros, e os giroscópios mantêm a direção norte como uma bússola magnética (CUREY et al., 2004).

O INS pode ser montado em uma plataforma fixa (*strapdown*), ou em uma plataforma suspensa por anéis de giroscópio (*gimbaled*). A IMU é constituída de três acelerômetros e três giroscópios que medem respectivamente as acelerações lineares e de gravidade em um referencial tridimensional específico, bem como as variações angulares de cada eixo no respectivo referencial. As saídas da IMU são incrementos dos ângulos e velocidades da plataforma inercial (ISA). Com isso, o INS estima a posição, atitude e velocidade de uma aeronave em função do tempo, utilizando a IMU, um relógio de referência e um modelo de campo gravitacional (CUREY et al., 2004). A FIGURA 14 apresenta as partes que compõem os modelos de INS *gimbaled* e *strapdown*.

FIGURA 14 – INS STRAPDOWN (esquerda) e INS GIMBALED (direita)



FONTE: Adaptado de CUREY et al. (2004)

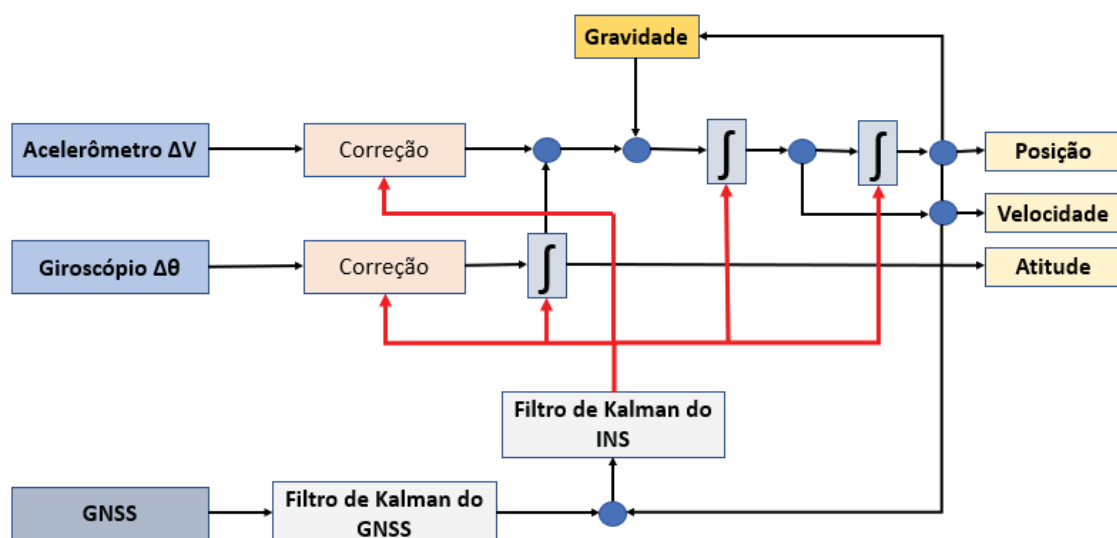
A IMU consiste em três acelerômetros e três giroscópios. Os acelerômetros medem a aceleração em três eixos ortogonais e os giroscópios medem as taxas angulares em torno desses eixos. A IMU é frequentemente incorporada em um INS, que processa os dados brutos da IMU para fornecer as informações de navegação. Os INS mais comuns, utilizados para o georreferenciamento de sensores aerotransportados, tanto em aeronave convencional quanto em drones, são os *strapdown* (BURMAN, 2000).

Segundo Scherzinger (2001), os Sistemas de Navegação Inercial (INS) foram desenvolvidos para aplicações militares. Com uma integração dupla da aceleração, e com informações de atitude do giroscópio, pode-se calcular a posição em relação a posição inicial. Como já fora explicado, o INS contém um IMU como mecanismo de medição, e foi nos anos 70 que este sensor começou a ser incorporado como ferramenta de posicionamento pela comunidade cartográfica. No final dos anos 80 e começo dos anos 90, algumas aplicações de mapeamento utilizando a integração GPS/INS foram feitas nas Universidades de Ohio, Estados Unidos, e na Universidade de Calgary, Canadá.

Muitos outros projetos posteriores foram feitos comprovando os bons resultados obtidos com a integração GNSS/INS como (COLOMINA, 1999; JACOBSEN, 1999; CRAMER et al., 2000; HEIPKE et al., 2002; CHIANG et al. 2015).

A grande vantagem do uso do GNSS/INS é sua atuação de forma complementar. Enquanto o GNSS fornece o posicionamento e a velocidade da plataforma, a INS fornece as informações de atitude durante seu deslocamento no espaço. Além disso, o INS pode fornecer a informação de posicionamento e velocidade com melhor acurácia e com maior frequência de dados do que as medições do GNSS. Com isso, o INS pode corrigir a incerteza do GNSS, até quando este apresenta perda de sinal. Na prática, o GNSS serve como um dispositivo de calibração para os erros residuais dos acelerômetros e dos giroscópios da IMU, sendo normalmente utilizado o Filtro de Kalman como estimador e compensador dos erros do sistema GNSS/INS (TOTH, SHAN, 2009; YASTIKLI, JACOBSEN, 2005). A FIGURA 15 ilustra a integração GNSS/INS mais utilizada em voos embarcados.

FIGURA 15 – DIAGRAMA DE INTEGRAÇÃO GNSS/INS



FONTE: Adaptado de CHIAN et al., 2015.

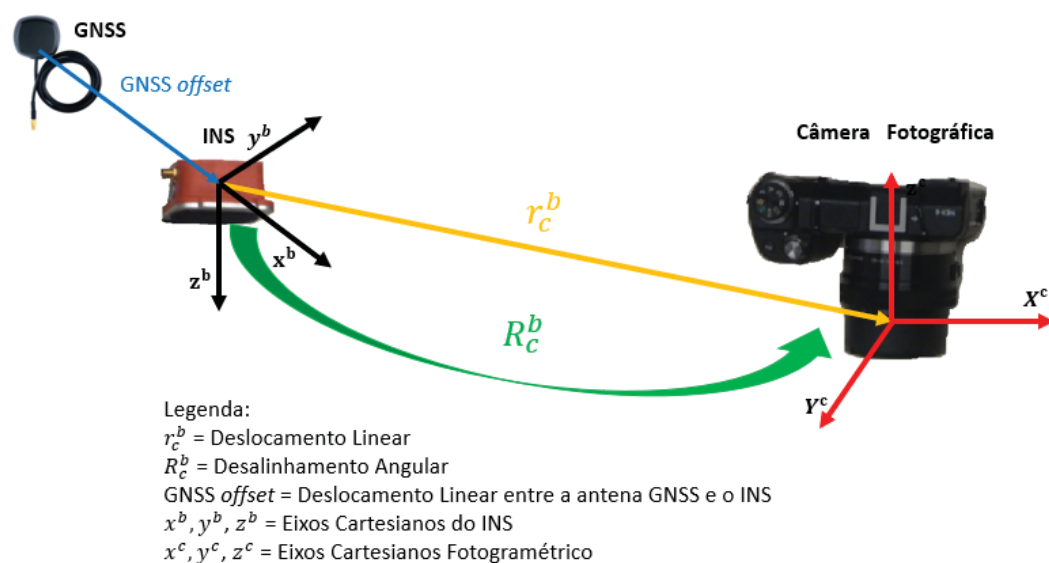
Para esta integração, no caso de uma constelação GNSS incompleta, isto é, com menos de quatro satélites identificados, a saída do receptor GNSS é completamente ignorada, deixando o INS sem informação externa. Este sistema, amplamente utilizado em drones, tem-se que os sinais de GNSS não são obstruídos ou refletidos por edifícios altos, porém, a vibração da plataforma do drone, ou certas manobras bruscas, nas trocas de faixas por exemplo, podem causar perdas do sinal (TSAI et al., 2011).

Esse problema pode ser ainda agravado quando se utiliza as medições de fase da portadora. Assim, a acurácia do sistema de orientação e posicionamento (POS) fica significativamente deteriorada quando se utiliza um GNSS/INS de baixo custo (CHIAN et al., 2015).

2.4 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONTAGEM

Como descrito anteriormente, os parâmetros de montagem de um sistema fotogramétrico aerotransportado baseado em GNSS/INS+câmera digital, o sistema compreendem a medida da distância entre o INS e a câmera digital, que marca o deslocamento linear entre os sensores (r_c^b), que pode ser determinado com um instrumento de topografia, e a diferença angular entre os eixos coordenados do INS e da câmera digital, conhecidos como desalinhamento angular (R_c^b) ou *boresight angles*, que é determinado por fotogrametria (YASTIKLI, JACOBSEN, 2005). A FIGURA 16 mostra as medidas de r_c^b e R_c^b .

FIGURA 16 – PARÂMETROS DE MONTAGEM DO SISTEMA



FONTE: O autor (2018).

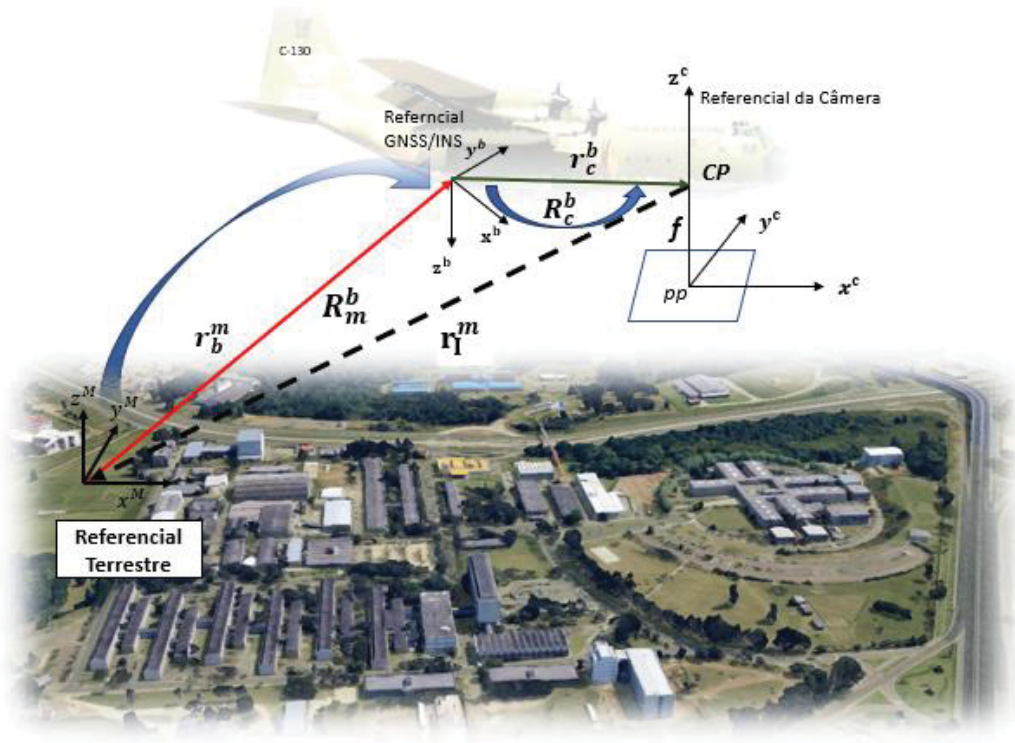
Na literatura há, basicamente, duas abordagens para calibração dos parâmetros de montagem, isto é, o método por etapas (*two-step*) e o método simultâneo (*single-step*). No método por etapas é usado o seguinte esquema para estimar os parâmetros de montagem do sistema, a saber:

$$r_{C|t}^b = R_m^b(t) \cdot (r_C^m(t) - r_b^m(t)) \quad (24)$$

$$R_{C|t}^b = R_m^b(t) \cdot R_C^m(t) \quad (25)$$

sendo $r_{C|t}^b$ e $R_{C|t}^b$ os parâmetros de montagem do sistema, isto é, o deslocamento linear e angular, respectivamente, $R_m^b(t)$ é a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenada terrestre com o sistema de coordenadas do INS (*yaw, pitch, roll*), $r_b^m(t)$ é um vetor de coordenadas 3D da origem do sistema de coordenadas do INS que é derivada do processo de integração GNSS/INS levando em consideração a transformação entre a origem do sistema de coordenadas do INS e o centro de fase da antena GPS, $r_C^m(t)$ e $R_C^m(t)$ são o vetor da coordenada 3D do centro perspectivo da câmera e a matriz de rotação 3D em função dos ângulos de Euler (k, φ, ω), respectivamente, ambos determinados por técnica de ajustamento de feixes de raios de luz perspectivos. Vale notar que (t) indica que os valores são fornecidos a cada instante de tempo. A FIGURA 17 mostra a geometria do modelo de colinearidade modificado, utilizando o método por etapas.

FIGURA 17 – GEOMETRIA DO MODELO DE COLINEARIDADE MODIFICADO (MÉTODO POR ETAPAS).



FONTE: O autor (2018)

Os vetores e matrizes apresentados nas Equações (24) e (25) podem ser reescritos da seguinte forma matricial, a saber:

$$r_c^m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_c^m \quad (26)$$

$$r_b^m = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_b^m \quad (27)$$

$$R_c^m = \begin{bmatrix} \cos \varphi_c \cos k_c & -\cos \varphi_c \sin k_c & \sin \varphi_c \\ \cos \omega_c \sin k_c + \sin \omega_c \sin \varphi_c \cos k_c & \cos \omega_c \cos k_c - \sin \omega_c \sin \varphi_c \sin k_c & -\sin \omega_c \cos \varphi_c \\ \sin \omega_c \sin k_c - \cos \omega_c \sin \varphi_c \cos k_c & \sin \omega_c \cos k_c + \cos \omega_c \sin \varphi_c \sin k_c & \cos \omega_c \cos \varphi_c \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$R_m^b = \begin{bmatrix} \cos P \cos H & -\cos P \sin H & \sin P \\ \cos \theta \sin H + \sin \theta \sin P \cos H & \cos \theta \cos H - \sin \theta \sin P \sin H & -\sin \theta \cos P \\ \sin \theta \sin H - \cos \theta \sin P \cos H & \sin \theta \cos H + \cos \theta \sin P \sin H & \cos \theta \cos P \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$R_c^b = \begin{bmatrix} \cos \Delta \varphi \cos \Delta k & -\cos \Delta \varphi \sin \Delta k & \sin \Delta \varphi \\ \cos \Delta \omega \sin \Delta k + \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi \cos \Delta k & \cos \Delta \omega \cos \Delta k - \sin \Delta \omega \sin \Delta \varphi \sin \Delta k & -\sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi \\ \sin \Delta \omega \sin \Delta k - \cos \Delta \omega \sin \Delta \varphi \cos \Delta k & \sin \Delta \omega \cos \Delta k + \cos \Delta \omega \sin \Delta \varphi \sin \Delta k & \cos \Delta \omega \cos \Delta \varphi \end{bmatrix} \quad (30)$$

Utilizando os termos $m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{23}$ e m_{33} de R_C^b com o objetivo de simplificar os cálculos da Equação (25), tem-se:

$$\cos \Delta \varphi \cos \Delta k = (\cos P \cos H). (\cos \varphi_C \cos k_C) + (-\cos P \sin H). (\cos \omega_C \sin k_C + \sin \omega_C \sin \varphi_C \cos k_C) + (\sin P). (\sin \omega_C \sin k_C - \cos \omega_C \sin \varphi_C \cos k_C) \quad (31)$$

$$-\cos \Delta \varphi \sin \Delta k = (\cos P \cos H)(-\cos \varphi_C \sin k_C) + (-\cos P \sin H). (\cos \omega_C \cos k_C - \sin \omega_C \sin \varphi_C \sin k_C) + (\sin P). (\sin \omega_C \cos k_C + \cos \omega_C \sin \varphi_C \sin k_C) \quad (32)$$

$$\sin \Delta \varphi = (\cos P \cos H). (\sin \varphi_C) + (-\cos P \sin H). (-\sin \omega_C \cos \varphi_C) + (\sin P). (\cos \omega_C \cos \varphi_C) \quad (33)$$

$$-\sin \Delta \omega \cos \Delta \varphi = (\cos \theta \sin H + \sin \theta \sin P \cos H). (\sin \varphi_C) + \cos \omega_C \cos k_C - \sin \omega_C \sin \varphi_C \sin k_C. (-\sin \omega_C \cos \varphi_C) + (-\sin \theta \cos P). (\cos \omega_C \cos \varphi_C) \quad (34)$$

$$\cos \Delta \omega \cos \Delta \varphi = (\cos P \cos H). (\sin \varphi_C) + (-\cos P \sin H). (-\sin \omega_C \cos \varphi_C) + (\sin P). (\cos \omega_C \cos \varphi_C) \quad (35)$$

Com base nos resultados obtidos nas Equações (31)-(35), os ângulos de desalinhamento angular (*boresight*) são calculados, como segue:

$$\Delta \varphi = \sin^{-1}(m_{13}) \quad (36)$$

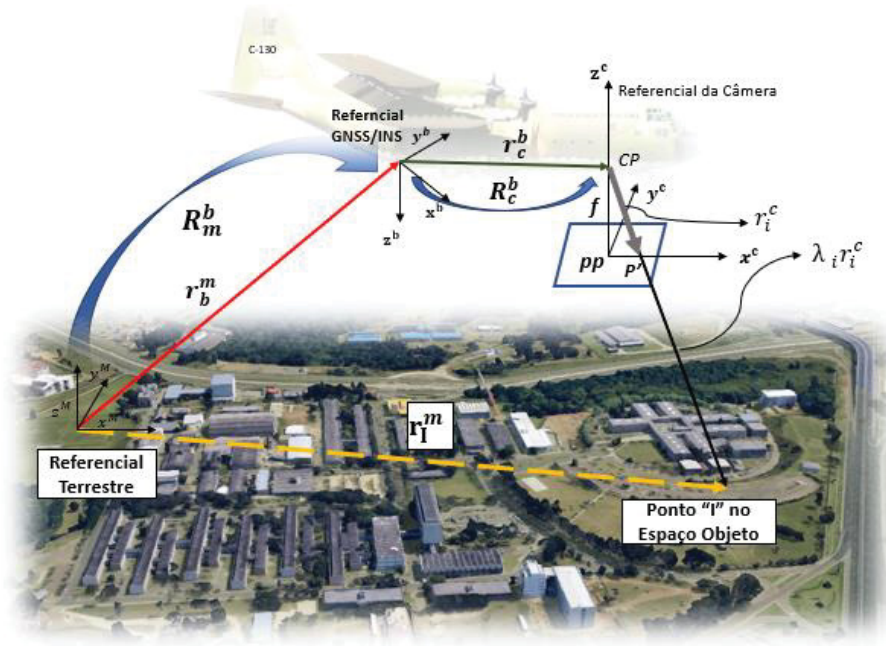
$$\Delta \omega = \tan^{-1} \left(\frac{-m_{23}}{m_{33}} \right) \quad (37)$$

$$\Delta k = \tan^{-1} \left(\frac{-m_{12}}{m_{11}} \right) \quad (38)$$

Note que os parâmetros de montagem do sistema estão em função do tempo (t), ou seja, considerando que um INS forneça dados na frequência de 100Hz, então serão medidas 100 observações por segundo, que corresponde a 100 estimativas por segundo de $R_m^b(t)$ e $r_b^m(t)$. Na prática, para se obter os valores de $R_m^b(t)$ e $r_b^m(t)$ é calculado a média do conjunto de medidas oriundas do INS, assim como o desvio padrão.

Já no método simultâneo, os parâmetros de montagem do sistema (r_C^b e R_C^b) são estimados através de técnica de ajustamento por feixes de raios de luz perspectivos, utilizando os dados derivados da integração GNSS/INS (HEIPKE; JACOBSEN (2002); CRAMER; STALLMANN (2002); HONKAVAARA et al. (2003); SMITH et al. (2006) e YUAN (2008)), também conhecido como modelo de colinearidade modificado. A FIGURA 18 mostra a geometria do modelo supracitado.

FIGURA 18 – GEOMETRIA DO MODELO DE COLINEARIDADE MODIFICADO (MÉTODO SIMULTÂNEO).



FONTE: O autor (2018)

Na FIGURA 18, as coordenadas do ponto (r) no referencial terrestre resultam da soma de três vetores após a aplicação das transformações necessárias para compatibilização dos sistemas, como segue (KERSTING, 2011):

$$r_I^m = r_b^m(t) + R_m^b(t) r_c^b + \lambda_i R_m^b(t) R_c^b r_i^c \quad (39)$$

$$r_i^c = \begin{bmatrix} x_i - x_0 - (\partial x + \delta_{dx}) \\ y_i - y_0 - (\partial y + \delta_{dy}) \\ -f \end{bmatrix} \quad (40)$$

sendo $r_b^m(t)$ o vetor de coordenadas 3D da origem do sistema referencial do INS, derivada do processo de integração GNSS/INS levando em consideração a transformação entre a origem do sistema INS e o centro de fase da antena GPS, $R_m^b(t)$ é a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenada terrestre com o sistema de coordenadas do INS (*yaw*, *pitch*, *roll*), r_c^b e R_c^b são os parâmetros de montagem de sistema que compreendem o desalinhamento linear e o deslocamento angular, respectivamente, entre a origem do sistema de coordenadas do INS e a origem do sistema referencial fotogramétrico, λ_i é o fator de escala, e r_i^c é um vetor imagem que compreende as fotocoordenadas no sistema referencial fotogramétrico (x_i e y_i), a distância focal da câmera (f), as coordenadas do ponto principal (x_0 e y_0) e as distorções das lentes (∂x , ∂y , δ_{dx} e δ_{dy}).

Note que, tanto r_c^b e R_c^b quanto f , x_0 , y_0 , Δx , Δy e os POEs de cada imagem são inseridos como parâmetros no processo de calibração, uma vez que os r_b^m e R_m^b são parâmetros de posição e orientação físicos do sensor fornecidos pela integração GNSS/INS e, por isso, o processo físico de formação da imagem deve ser conhecido com alto grau de confiabilidade para evitar que erros sistemáticos, não modelados, afetem a qualidade do georreferenciamento direto.

2.5. SISTEMA DE VARREDURA LASER AEROTRANSPORTADO

O sistema LiDAR é uma ferramenta capaz de propiciar nuvens de pontos 3D sobre a superfície terrestre com alto nível de detalhe, de forma rápida, precisa e com segurança. O LiDAR mede a distância inclinada (ρ) entre o sensor e alvos terrestres. A determinação dessa grandeza pode ser realizada por três métodos distintos, que definem seu princípio de funcionamento: ToF (*Time-of-Flight*), por diferença de fase e triangulação. O sistema que utiliza o princípio de medida baseado na técnica TOF aciona um temporizador simultaneamente à emissão do pulso LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para a superfície física. Ao atingi-la, o pulso interage com o objeto perfilado e retorna ao sensor. Conhecendo-se a velocidade da luz no ar ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s), a Equação (14) é usada para determinar a distância inclinada (D) entre o sensor e os pontos adquiridos (SHAN e TOTH, 2010), como segue:

$$\rho = \frac{\tau}{2}c \quad (41)$$

sendo τ o tempo de emissão e recepção do pulso LASER.

Com a introdução do georreferenciamento direto de imagens na década de 90 e com a comercialização de INS de alta performance e constelação GPS completa, pode-se obter dados LiDAR com acurácia de posição em torno de 4-7 cm e de atitude em torno de 20"–60". Segundo SHAN e TOTH (2009) um sistema LiDAR aerotransportado possui como componentes principais um gerador de pulsos LASER, um conjunto óptico de emissão e recepção do pulso, um detector de sinais com medidor de tempo e uma unidade de controle e armazenamento. Após a geração do pulso LASER, o conjunto óptico de lentes e espelhos orienta o pulso emitindo-o em direção a superfície física. O sinal de retorno do pulso emitido passa novamente por um conjunto óptico sendo direcionado à parte eletrônica de recepção do sensor que, através de um conversor, transforma o sinal analógico recebido em digital.

O sinal digital da radiação refletida passa por um controlador de ruído que verifica se o sinal recebido é compatível com o sinal emitido (WEHR e LOHR, 1999; SHAN e TOTH, 2008).

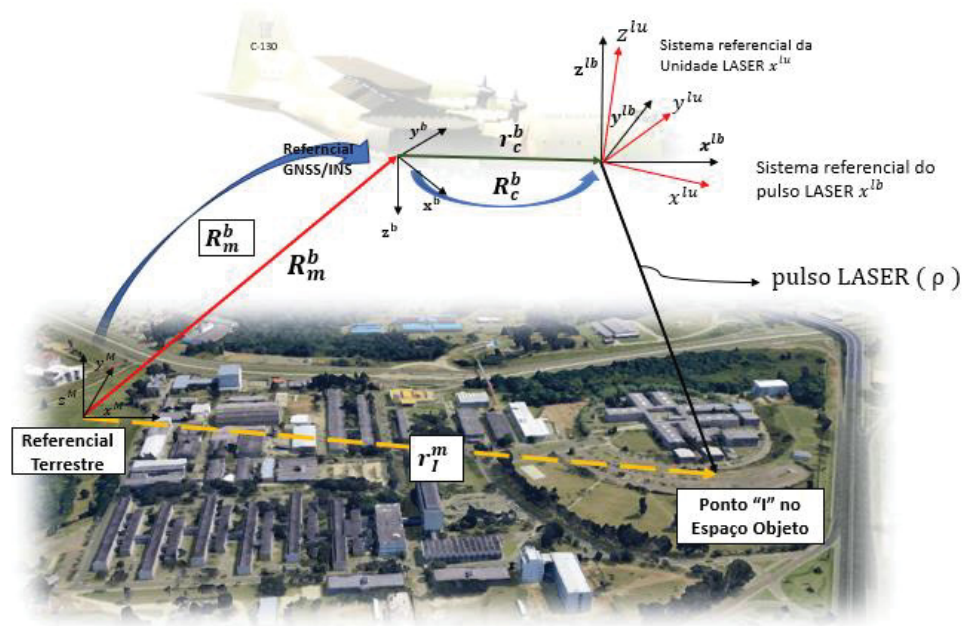
Com o perfilamento da superfície é obtido uma grande quantidade de dados regularmente amostrados denominada de nuvens de pontos 3D. Para calcular um ponto no espaço objeto utilizando o sistema LiDAR aerotransportado é feito uma soma de três vetores, após a aplicação das rotações necessárias para compatibilização dos sistemas, como segue (SHAN e TOTH, 2008):

$$r_I^m = r_b^m(t) + R_m^b r_c^b + R_m^b R_c^b R_V \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{bmatrix} \quad (42)$$

sendo r_I^m a coordenada do ponto LiDAR em relação ao referencial terrestre, $r_b^m(t)$ a coordenada terrestre da origem do sistema INS, R_m^b a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenada terrestre com o sistema de coordenadas do INS (ângulos ω , φ , κ), r_c^b o deslocamento linear da montagem do sistema, R_c^b o desalinhamento angular do sistema, R_V a matriz de rotação que aplica o ângulo do espelho oscilante na medida de distância do dispositivo de perfilamento, ρ a distância entre o alvo e a origem do dispositivo de varredura.

A FIGURA 19 ilustra a relação entre cada componente da Equação 43. Todos os valores envolvidos são mensurados durante o processo de aquisição dos dados, com exceção dos parâmetros de montagem (r_c^b e R_c^b), que usualmente são obtidos na etapa de calibração do sistema.

FIGURA 19 – RELAÇÃO ENTRE OS REFERENCIAIS DO SISTEMA LiDAR AEROTRANSPORTADO



FONTE: O autor (2018)

2.6 ALGORITMO RANSAC

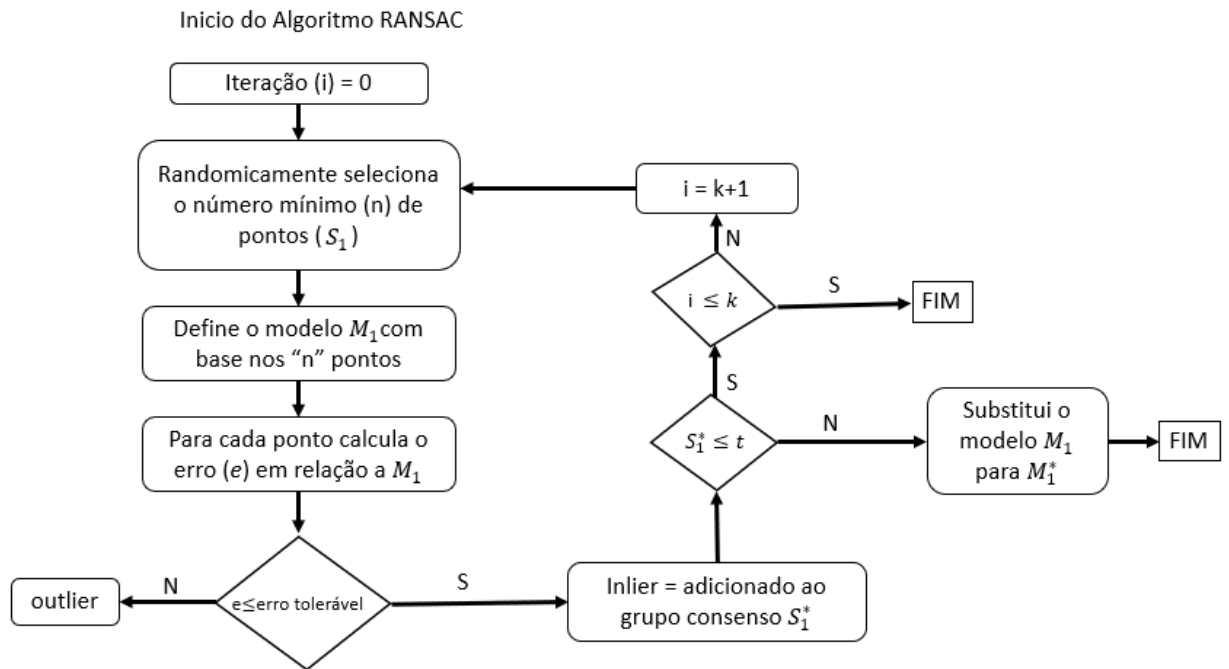
O algoritmo RANSAC (*Random Sample Consensus*) foi desenvolvido por Fischler e Bolles (1981) como solução do problema de resseção espacial de imagens. Este algoritmo é baseado na noção de conjuntos mínimos de pontos (n), pertencentes ao conjunto de dados \mathfrak{X} , que consiste no menor número de amostras necessárias para definir um modelo de modo unívoco. Basicamente, o algoritmo é dividido em três partes:

1) Dado um modelo que requer o mínimo de n observações (subconjunto S_1), com $\mathfrak{X} \geq n$, para a estimação de um modelo matemático M_1 , a partir do qual determina-se um subconjunto de observações S_1^* , constituído de todos os pontos de \mathfrak{X} que apresentam um erro igual ou inferior a um erro tolerável (e) pré-estabelecido. A esse grupo nomeia-se de consenso e é constituído por pontos denominados de *inliers*. As observações que permanecem acima do erro tolerável, são considerados como *pontos espúrios*;

2) Se S_1^* for maior que um limiar t (estimado em função dos pontos espúrios presentes no conjunto \mathfrak{X}), será determinado um novo modelo matemático M_1^* , a partir da aplicação do MMQ. Caso não seja a última iteração (k) do processo, retorna-se a etapa (1);

3) Caso S_1^* não se apresente abaixo do limiar t , o algoritmo realiza randomicamente uma busca de um novo subconjunto (S_2), inicializando novamente o processo. A FIGURA 20 mostra um fluxograma do algoritmo RANSAC.

FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO RANSAC



FONTE: O autor (2019).

Para a inicialização do algoritmo é importante a identificação de três variáveis: o erro tolerável (e), o limiar (t) e o número de iterações (k). A variável (e) permite decidir se um ponto qualquer pertence ou não pertence ao subconjunto S_1 , geralmente determinado a partir de evidências experimentais. O limiar (t) indica o número mínimo de pontos que pertençam a um grupo consenso para se estimar corretamente o modelo matemático. A quantidade de iterações (k) será determinada a partir do número esperado de tentativas necessárias para selecionar um subconjunto com n pontos a partir de uma análise probabilística (w) de que qualquer ponto pertencente a \mathfrak{X} esteja abaixo de e . Logo, a probabilidade em que uma dada observação gere um erro menor do que o tolerável é de w^{-n} . Portanto, existe uma probabilidade de $(1 - w^{-n})$ de que um ponto pertença ao modelo. Para k iterações, a probabilidade é multiplicada por k vezes, que corresponde a probabilidade $(1 - p)$ de o algoritmo selecionar qualquer amostra de n pontos válidos a cada iteração (FISHER; BOLLES, 1981), obtendo a igualdade apresentada na equação (44).

$$(1 - w)^n = (1 - p) \quad (43)$$

sendo w a probabilidade de se encontrar uma boa amostra inicial, p a probabilidade de se encontrar um ponto válido a cada iteração.

Sabendo que a probabilidade de se encontrar um ponto (*inlier*) em cada iteração é o número de pontos que constituem o grupo consenso dividido pelo total de pontos do conjunto de dados N , o número de iterações pode ser estimado de acordo com a Equação (44).

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - w^n)} \quad (44)$$

A probabilidade p é determinada dentro do intervalo $0,95 \leq p \leq 0,99$. Na última iteração os parâmetros do modelo matemático são ajustados pelo MMQ (Método dos Mínimos Quadrados).

2.7 FILTRO MORFOLÓGICO PROGRESSIVO

O filtro morfológico progressivo (ZHANG et.al., 2003) tem como objetivo separar objetos de terreno e não terreno, tais como, elevações (edifícios, veículos e vegetação) usando a diferença de elevação em uma janela de busca progressiva. O funcionamento do filtro morfológico progressivo possui as seguintes entradas:

1. Tamanho da célula: a nuvem de pontos passa a ser representada no formato matricial, no qual cada célula contém um valor de altitude. Se uma célula abranger mais do que um ponto, o valor de altitude adotado será igual a menor altitude. No caso de uma célula não conter pontos, o seu valor será definido através da interpolação dos pontos mais próximos;
2. Base: parâmetro que define o aumento progressivo da janela. Esse tamanho pode aumentar linearmente (Equação 45) ou exponencialmente (Equação 46). Na equação linear, a base corresponde ao tamanho inicial da janela, enquanto que na equação exponencial refere-se à base da função exponencial.

$$w_k = 2kb + 1, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (45)$$

$$w_k = 2b^k + 1, \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (46)$$

sendo w_k o tamanho da janela, b a base, M o maior valor de k e w_M o tamanho máximo da janela.

3. Declividade: valor que descreve a inclinação do terreno. É definida pelo quociente entre a diferença de altura do terreno com a distância horizontal. Assumindo que a declividade é constante, é possível relacioná-la com o tamanho da janela e com a maior diferença de elevação do terreno.

$$s = \frac{dh_{\max(t),k}}{\frac{(w_k - w_{k-1})}{2}} \quad (47)$$

sendo s a declividade e $dh_{\max(t),k}$ a diferença de altura máxima do terreno para um determinado valor de k .

4. Limiar de diferença de elevação inicial: consiste no valor inicial adotado como limiar que define se um ponto pertence ao terreno ou não. A cada iteração o valor do limiar é recalculado em função da declividade, tamanho da janela e tamanho da célula, conforme consta na Equação 48. Pontos pertencentes a edifícios ou árvores que apresentarem altura inferior em relação ao limiar, serão classificados incorretamente como sendo pertencentes ao terreno.

$$dh_{T,k} = \begin{cases} dh_0 & \text{se } w_k \leq 3 \\ s(w_k - w_{k-1})c + dh_0 & \text{se } w_k > 3 \\ dh_{\max} & \text{se } dh_{T,k} > dh_{\max} \end{cases} \quad (48)$$

sendo $dh_{T,k}$ o limiar de diferença de elevação, c o tamanho da célula, dh_0 o limiar de diferença de elevação inicial e dh_{\max} a maior diferença de elevação.

5. Maior diferença de elevação: consiste na maior diferença de elevação da área de estudo. É definida por um valor fixo, com a finalidade de permitir que edificações complexas possam ser identificadas.

2.8 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL

Para avaliar o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD) - planimetria, seguindo a descrição da ET-CQDG, deve-se:

1. Selecionar pontos de controle com precisão pelo menos três vezes superior ao produto que será avaliado. Os pontos devem ser perfeitamente identificados no terreno e no produto. O tamanho da amostra é determinado pelo processo de avaliação.
2. Calcular a discrepância em cada componente planimétrico para o universo de pontos considerados. Os pontos do produto que serão testados são identificados

pelo sufixo “ t ” e os pontos de referência (controle) são identificados pelo sufixo “ r ”.

$$e_x = x_t - x_r \quad (49)$$

$$e_y = y_t - y_r \quad (50)$$

3. Calcular a componente horizontal dos erros para cada “ i ” ponto da amostra:

$$e_{Hi} = \sqrt{e_{xi}^2 + e_{yi}^2} \quad (51)$$

4. Calcular o Erro Médio Quadrático (EMQ_H) dos erros da amostra:

$$EMQ_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{Hi}^2)}{n}} \quad (52)$$

5. Comparar cada valor de e_{Hi} com o erro máximo admissível (EM) da tabela PEC para cada classe. O produto se enquadra onde tiver pelo menos 90% de pontos com erro inferior ao EM. Se nenhum valor for correspondente o resultado será “não conforme” e encerra-se a medida.
6. Comparar o valor do EMQ_H com o erro-padrão da tabela PEC para a classe identificada no passo 5. Se for menor, o resultado é a classe encontrada no passo 5. Se for maior, caminha-se na tabela PEC até encontrar um valor menor ou, caso não seja encontrado, a medida resulta “não conforme”.

E para avaliar o Padrão de Acurácia Posicional para Produtos Cartográficos Digitais (PAP-PCD) - altimetria, seguindo a descrição da ET-CQDG, deve-se:

1. Selecionar pontos de controle com precisão pelo menos três vezes superior ao produto que será avaliado. Os pontos devem ser perfeitamente identificados no terreno e no produto. O tamanho da amostra é determinado pelo processo de avaliação.
2. Calcular a discrepância em cada componente altimétrico para o universo de pontos considerados. Os pontos do produto que serão testados são identificados pelo sufixo “ t ” e os pontos de referência (controle) são identificados pelo sufixo “ r ”.

$$e_z = z_t - z_r \quad (53)$$

3. Calcular o Erro Médio Quadrático (EMQ_Z) dos erros da amostra:

$$EMQ_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{zi}^2)}{n}} \quad (54)$$

4. Comparar cada valor de e_{zi} com o erro máximo admissível (EM) da tabela PEC para cada classe. O produto se enquadra onde tiver pelo menos 90% de pontos

com erro inferior ao EM. Se nenhum valor for correspondente o resultado será “não conforme” e encerra-se a medida.

5. Comparar o valor de EMQ_z com o erro-padrão da tabela PEC para a classe identificada no passo 4. Se for menor, o resultado é a classe encontrada no passo 4. Se for maior, caminha-se na tabela PEC até encontrar um valor menor ou, caso não seja encontrado, a medida resulta “não conforme”.

TABELA 3 – Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP) em metros, para a planimetria e altimetria para Carta Ortoimagem.

Tipo	PEC	1/25.000		1/50.000		1/100.000		1/250.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	12,5	7,5	25	15	50	30	125	75
	B	20	12,5	40	25	80	50	200	125
	C	25	15	50	30	100	60	250	150
Altimetria	A	5,0	3,33	10	6,67	25	16,67	50	33,33
	B	6,0	4,0	12	8,0	30	20	60	40
	C	7,5	5,0	15	10	37,5	25	75	50
Tipo	PEC	1/1.000		1/2.000		1/5.000		1/10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	0,5	0,3	1,0	0,6	2,5	1,5	5,0	3,0
	B	0,8	0,5	1,6	1,0	4,0	2,5	8,0	5,0
	C	1,0	0,6	2,0	1,2	5,0	3,0	10	6,0
Altimetria	A	0,5	0,33	0,5	0,33	1,0	0,67	2,5	1,67
	B	0,6	0,4	0,6	0,4	1,2	0,8	3,0	2,0
	C	0,75	0,5	0,75	0,5	1,5	1,0	3,75	2,5

FONTE: DSG(2011)

A TABELA 3 mostra com os valores do erro médio (EM) e erro padrão para Ortofotocartas de pequena e grande escala.

3 MATERIAIS E MÉTODO

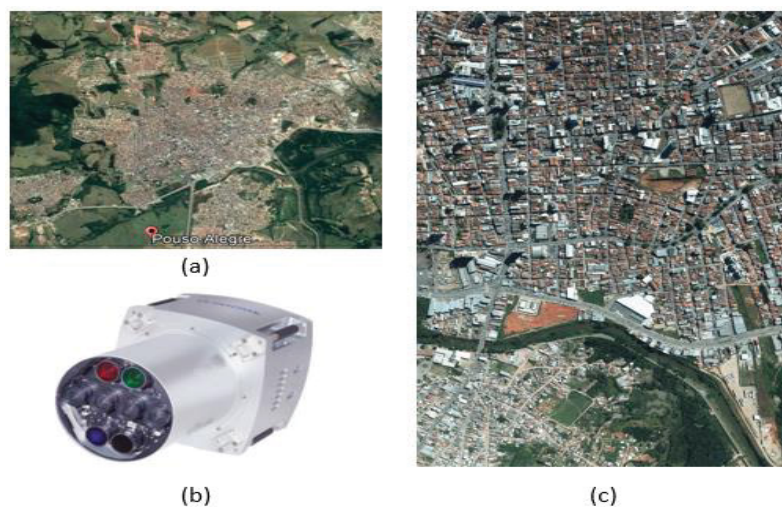
Este Capítulo tem como objetivo apresentar os materiais e o método proposto neste trabalho. No Subitem 3.1 será descrito os dados e os recursos de hardware e software empregados no desenvolvimento do trabalho. O método proposto é apresentado no Subitem 3.2.

3.1 MATERIAIS

Para a presente pesquisa foram empregados os seguintes materiais, a saber:

- ✓ Imagens aéreas da cidade de Pouso Alegre – MG, adquiridas em maio de 2015, com altura de voo aproximada de 1600m, sobreposição lateral de 30%, e sobreposição longitudinal de 60%. O sub-bloco fotogramétrico é composto de 6 (seis) imagens, sendo 3 (três) imagens obtidas na direção sudoeste e 3 (três) imagens tomadas na direção nordeste. As imagens foram adquiridas utilizando a câmera digital UltraCam XP (S/N UC-SXp-1-40813045), que é montada com LinosVexcel Apo-Sironar Digital HR 5.6/100mm. A imagem sintética gerada possui cerca de 195,7 Mpx (11310 x 17310) pixels, com o tamanho do pixel pancromático de 6.0 μm , e um GSD (*Ground Sample Distance*) próximo a 0,10m. A FIGURA 20 mostra a área imageada, o sensor UltraCam XP utilizado para adquirir as imagens e um exemplo de imagem sintética gerada, respectivamente.

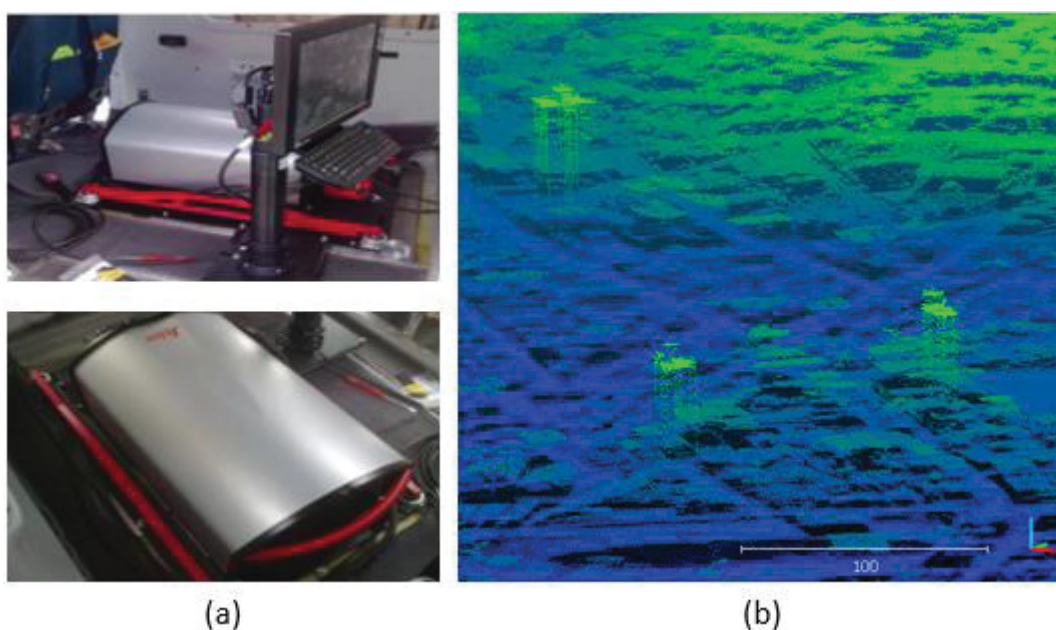
FIGURA 20 – (a) ÁREA DE ESTUDO, (b) SENSOR DE IMAGEAMENTO, (c) IMAGEM SINTÉTICA



FONTE: O autor (2019).

- ✓ 01 INS da Applanix, modelo POS AV 310, que apresenta as seguintes precisões absolutas pós-processadas (RMS): Posição horizontal de 0,02m e posição vertical de 0,05m, velocidade $0,01 \frac{m}{s}$, *roll* e *pitch* < 0,015° e *heading* < 0,035°;
- ✓ 01 nuvem de pontos obtido pelo sensor LiDAR aerotransportado da marca Leica ALS60, modelo CUS6 IMU, que possui as seguintes precisões absolutas (RMS): Posicional, entre 5 e 30 cm, *roll* e *pitch* < 0,0025°, *heading* < 0,005°. A nuvem de pontos possui densidade aproximada de $5 \frac{pontos}{m^2}$. A FIGURA 21 mostra os componentes do ALS60 embarcados em uma aeronave e um recorte da imagem de intensidade adquirida por este sensor, que também foi empregado neste trabalho.

FIGURA 21 – (a) SENSOR LiDAR, (b) RECORTE DA IMAGEM HIPSOMÉTRICA



FONTE: O autor (2019).

O Quadro 1 descreve as principais características do sensor.

QUADRO 1 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA LIDAR ALS60

Ano/Mês de aquisição	2015 / Junho
Altitude de operação	1600 m
Densidade da Nuvem	$5 \text{ pts} / m^2$
Acurácia altimétrica	15 cm
Acurácia planimétrica	20 cm
Mecanismo	Espelho oscilante

FONTE: Leica ALS60

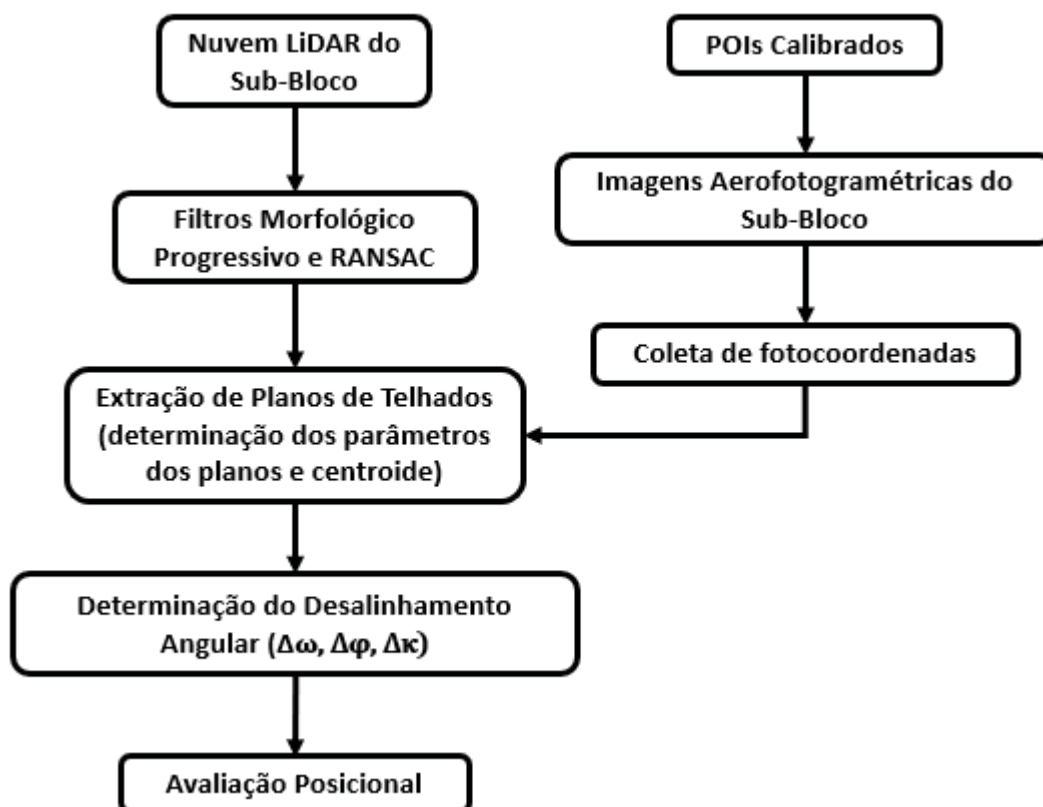
- ✓ 01 computador com processador Intel Core i5 2500, com 8 GB de memória RAM DDR3, disco rígido primário SSD de 250 GB, disco rígido secundário magnético de 3 TB e placa de vídeo Radeon HD6850 com 1GB de memória de vídeo, com sistema operacional Windows 7 64 bits.
- ✓ MATLAB (*Matrix Laboratory*) R2015: é um ambiente iinterativo e uma linguagem de alto nível voltada para o cálculo numérico. Neste programa foi implementado o modelo matemático proposto.
- ✓ CodeBlocks (v.16.01): é um software livre utilizado para compilar o código em C++.
- ✓ *Point Cloud Library* (PCL 1.8.0): consiste numa biblioteca C++ para processamento de nuvem de pontos.
- ✓ *Cloud Compare* (v.2.9.0): visualizador gratuito de nuvem de pontos em 3D.
- ✓ Quantum GIS (v.2.14.3 Essen): software gratuito, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG) que permite a visualização, edição e análise de dados geoespaciais.
- ✓ Statgraphics Centurion: software para análise estatística dos resultados.

A seguir será apresentado o método proposto neste trabalho.

3.2 MÉTODO

O método proposto para a determinação dos parâmetros de montagem utiliza um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-plano e apoio de campo derivado do sistema LiDAR aerotransportado é dividido em quatro etapas principais: 1) Extração de planos de telhados na nuvem de pontos LiDAR; 2) Estratégia de correspondência entre espaço-imagem e espaço-objeto; 3) Desenvolvimento do modelo matemático para calibração do parâmetro de desalinhamento angular do sistema; e 4) Extração de pontos LiDAR através da intersecção de planos de telhados adjacentes para serem utilizados no teste de precisão posicional do modelo. A FIGURA 22 mostra as principais etapas do método proposto.

FIGURA 22 – ETAPAS DO MÉTODO PROPOSTO



FONTE: O autor (2019)

Como pode ser observado na FIGURA 22, os valores dos POIs obtidos em um processo de calibração de câmeras, a nuvem de pontos LiDAR e as fotocoordenadas coletadas no sub-bloco fotogramétrico são usados como dados de entrada no método proposto. Os pontos de elevação são separados dos pontos de terreno e os planos de telhados são extraídos e segmentados. Com isto, os vetores normais dos planos de telhado são estimados e os pontos de apoio LiDAR são determinados via intersecção de três planos adjacentes. Finalmente, os parâmetros de desalinhamento angular são estimados usando a abordagem ponto-a-plano proposto neste trabalho e uma avaliação da acurácia posicional é realizado para validação do modelo matemático desenvolvido. A seguir será descrito cada uma das etapas apresentada na FIGURA 22.

3.2.1 Extração automática de planos de telhados na nuvem de pontos LiDAR

Esta etapa do método consiste em extrair automaticamente planos de telhados e pontos LiDAR presentes na nuvem de pontos. Esta tarefa é dividida em três partes. Primeiro, o Filtro Morfológico Progressivo é executado para separar as elevações (edificações e vegetação) dos pontos de terreno. Em seguida, o algoritmo RANSAC é

empregado para extrair superfícies planas na nuvem de pontos LiDAR. Nesta parte do processamento, os pontos que pertencem aos objetos de vegetação são eliminados do processamento uma vez que as seguintes condições para cada ponto da nuvem são estabelecidas como segue:

- (a) são selecionados os K vizinhos mais próximos do ponto i e aplicado o algoritmo RANSAC. Então, os planos são extraídos com tolerância ε e número t de conjuntos mínimos. O RANSAC extrai o plano que apresenta maior número de pontos.
- (b) para o ponto i não ser descartado, ele deve atender as seguintes condições: (1) o plano extraído deve possuir um número mínimo de pontos, (2) o ponto i deve pertencer ao plano, ou seja, sua distância em relação ao plano deve ser inferior ao valor da tolerância ε , (3) o ângulo de inclinação do plano em relação à horizontal deve ser superior a α° e inferior a β° . Se o ponto i atende as condições a, b e c, suas coordenadas são armazenadas, e os parâmetros dos planos são calculados.

Desta forma, os parâmetros do plano (a, b, c, d) são estimados usando o método de PATHAK et al. (2010). Sabendo que a equação geral do plano é definida como (STEINBRUCH e WINTERLE, 2006):

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (55)$$

sendo a , b , c e d os parâmetros do plano, x , y e z as coordenadas 3D de um ponto pertencente a superfície plana. A Equação (53) pode ser reescrita pela multiplicação de duas matrizes, como segue:

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = 0 \quad (56)$$

Considerando que os parâmetros de um plano, extraído na nuvem de pontos LiDAR, são tais que a soma dos quadrados dos resíduos de cada ponto contido neste plano é minimizado da forma como segue:

$$\sum_{i=1}^n \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} = \min \quad (57)$$

sendo r_i o resíduo do plano em relação ao ponto $p_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ com $i = 1, 2, \dots, n$, isto é, $ax_i + by_i + cz_i + d = r_i$, n é o número de pontos pertencentes ao plano, $\hat{\sigma}_i^2$ um valor de peso para cada ponto p_i dado em função do valor da variância da distância do ponto p_i à origem do sistema.

O somatório na Equação (57) pode ser reescrito como o somatório de uma multiplicação de matrizes, como segue:

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\hat{\sigma}_i^2} \left([x_i \ y_i \ z_i \ 1] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \right)^T [x_i \ y_i \ z_i \ 1] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \right) = \min \quad (58)$$

Utilizando as propriedades de multiplicação de matrizes tem-se:

$$[a \ b \ c \ d] \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{\sigma}_i^2} \left(\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} [x_i \ y_i \ z_i \ 1] \right) \right) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = [a \ b \ c \ d] B \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \min \quad (59)$$

Como a matriz $B = \sum_{i=1}^n ([x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T [x_i \ y_i \ z_i \ 1])$ é uma matriz 4×4 simétrica, logo essa matriz tem os autovalores reais, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ sendo $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4$ com os correspondentes auto-vetores $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4$ unitários e ortogonais entre eles. Desta forma, pode-se aplicar o seguinte teorema apresentado por Anton e Rorres (2001), a saber:

Teorema: Seja B uma matriz $n \times n$ simétrica, cujos autovalores em ordem decrescente de tamanho são $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ e seja o vetor \mathbf{v} restrito a $\|\mathbf{v}\| = 1$, relativamente ao produto interno euclidiano de \mathbb{R}^n , então:

- (a) $\lambda_1 \geq \mathbf{v}^T A \mathbf{v} \geq \lambda_n$
- (b) $\mathbf{v}^T A \mathbf{v} = \lambda_n$ se \mathbf{v} é um auto-vetor de A associado a λ_n ; e
- (c) $\mathbf{v}^T A \mathbf{v} = \lambda_1$ se \mathbf{v} é um auto-vetor de A associado a λ_1 .

Deste modo, os parâmetros do plano são obtidos por meio das componentes do auto-vetor \mathbf{v}_4 , que corresponde ao menor auto-valor λ_4 da matriz B . Depois desse processo, os parâmetros supracitados precisam ser normalizados de forma que o vetor normal ao plano seja unitário, como segue:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1-v_{4w}^2}} \begin{bmatrix} v_{4x} \\ v_{4y} \\ v_{4z} \\ v_{4w} \end{bmatrix} \quad (60)$$

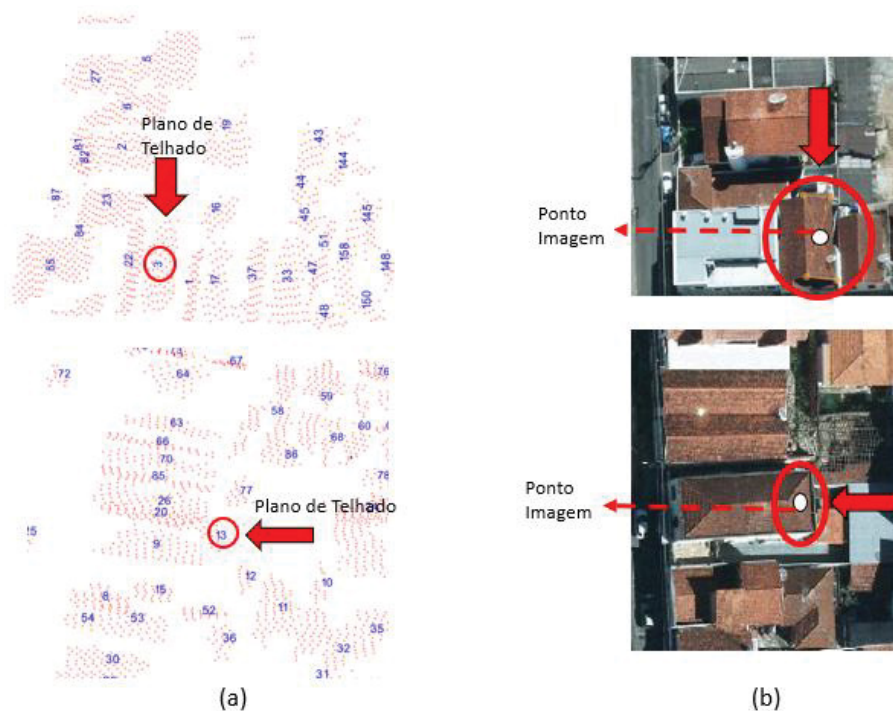
sendo v_{4x} , v_{4y} e v_{4z} as coordenadas do auto-vetor v_4 .

Por fim, é obtido um arquivo em formato texto com os parâmetros dos planos numerados, conforme o número de planos extraídos da nuvem LiDAR, as coordenadas do centroide de cada plano e o número de pontos de cada plano extraído. Após esta etapa, é determinado também os pontos de controle LiDAR (LCPs) através da intersecção de planos de telhados adjacentes. Vale salientar que esta tarefa é feita de forma manual.

3.2.2. Estratégia de correspondência ponto-a-plano

Esta etapa do método consiste em estabelecer, manualmente, a correspondência entre pontos imagem e planos de telhados extraídos na nuvem de pontos LiDAR. Por exemplo, dado uma imagem aérea e um conjunto de planos de telhados extraídos pelo algoritmo RASANC, o operador identifica os planos de telhados correspondentes e coleta um ponto qualquer na imagem, como mostra a FIGURA 23.

FIGURA 23 – (a) PLANOS DE TELHADOS EXTRAÍDOS DA NUVEM LiDAR, (b) PONTO IMAGEM CORRESPONDENTE



FONTE: O autor (2019)

A seguir será apresentado o modelo proposto para estimativa do parâmetro de desalinhamento angular de montagem do sistema.

3.2.3 Determinação dos parâmetros de desalinhamento angular

A formulação do modelo matemático proposto neste trabalho é baseada em uma abordagem ponto-a-plano que servirá para estimar os ângulos de desalinhamento entre o INS e o CP da câmera digital. O modelo proposto parte de duas premissas básicas, a saber:

- 1) Em situações de georreferenciamento direto de imagens, as coordenadas de um ponto no espaço objeto (r_I^m) são determinadas pela soma de três vetores, após a aplicação das transformações necessárias para compatibilização dos sistemas, da forma que segue:

$$r_I^m = r_b^m(t) + R_m^b(t)r_c^b + \lambda_i R_m^b(t)R_c^b r_i^c \quad (61)$$

sendo $r_b^m(t)$ o vetor das coordenadas 3D da origem do sistema de coordenadas do INS, derivada do processo de integração GNSS/INS levando em consideração a transformação entre a origem do sistema de coordenadas do INS e o centro de fase da antena GNSS, R_m^b a matriz de rotação que relaciona o sistema de coordenada terrestre com o sistema de coordenadas do INS (*yaw*, *pitch*, *roll*), r_c^b e R_c^b os parâmetros de montagem do sistema que compreendem o deslocamento linear e o desalinhamento angular, respectivamente, entre a origem do sistema de coordenadas do INS e o CP da câmera, λ_i é o fator de escala, t corresponde ao tempo de aquisição de cada um dos dados e r_i^c é o vetor das fotocoordenadas no sistema referencial fotogramétrico já corrigidas das distorções das lentes.

- 2) Considerando que um ponto $p = [x \ y \ z]^T$ pertence a um plano extraído da nuvem de pontos LiDAR (\mathbb{X}). Essa relação pode ser representada matematicamente como o produto interno entre dois vetores, a saber:

$$np + d = 0 \quad (62)$$

sendo, $n = [a, b, c]$

Considerando que $r_I^m = p$, e utilizando as equações de colinearidade modificada na forma inversa tem-se as seguintes equações, a saber:

$$x - X_0 - (r_{11}L_x + r_{12}L_y + r_{13}L_z) = \lambda_i (m_{11}x'_c + m_{21}y'_c - m_{31}f) \quad (63)$$

$$y - Y_0 - (r_{21}L_x + r_{22}L_y + r_{23}L_z) = \lambda_i (m_{12}x'_c + m_{22}y'_c - m_{32}f) \quad (64)$$

$$z - Z_0 - (r_{31}L_x + r_{32}L_y + r_{33}L_z) = \lambda_i (m_{13}x'_c + m_{23}y'_c - m_{33}f) \quad (65)$$

sendo x, y, z as coordenadas de um ponto extraído da nuvem LiDAR, L_x, L_y, L_z os valores de deslocamento linear entre INS e CP da câmera, X_0, Y_0, Z_0 a posição do inercial, obtido pelo georreferenciamento direto do GNSS/INS, $m_{i,j} = R_m^b(t) * R_C^b$ corresponde aos elementos da matriz de rotação resultante da multiplicação entre as matrizes de rotação do INS e do desalinhamento angular (*boresight*), λ é o fator de escala, x'_c e y'_c as fotocoordenadas no sistema referencial fotogramétrico corrigidas das distorções das lentes e f a distância focal calibrada da câmera.

Dividindo as Equações (61) e (62) pela Equação (63) é eliminado o fator de escala λ_i , como segue:

$$x = X_0 + (z - Z_0) \left(\frac{m_{11}(x'_c + LA_1) + m_{21}(y'_c + LA_2) - m_{31}(f + LA_3)}{m_{13}(x'_c + LA_1) + m_{23}(y'_c + LA_2) - m_{33}(f + LA_3)} \right) \quad (66)$$

$$y = Y_0 + (z - Z_0) \left(\frac{m_{12}(x'_c + LA_1) + m_{22}(y'_c + LA_2) - m_{32}(f + LA_3)}{m_{13}(x'_c + LA_1) + m_{23}(y'_c + LA_2) - m_{33}(f + LA_3)} \right) \quad (67)$$

sendo LA_1, LA_2, LA_3 , é o deslocamento linear (*lever-arm*) multiplicado pela matriz de rotação do INS $R_m^b(t)$.

Substituindo as Equações (66) e (67) na Equação (62) tem-se:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 + (z - Z_0) \frac{N_x}{D_n} \\ Y_0 + (z - Z_0) \frac{N_y}{D_n} \\ z \end{bmatrix} + d = 0 \quad (68)$$

Sendo

a, b, c, d os parâmetros do plano

X_0, Y_0, Z_0 a posição fornecida pelo GNSS/INS

z a coordenada z obtida da nuvem de pontos LiDAR

$$N_x = m_{11}(x'_c + LA_1) + m_{21}(y'_c + LA_2) - m_{31}(f + LA_3),$$

$$N_y = m_{12}(x'_c + LA_1) + m_{22}(y'_c + LA_2) - m_{32}(f + LA_3),$$

$$D_n = m_{13}(x'_c + LA_1) + m_{23}(y'_c + LA_2) - m_{33}(f + LA_3) ,$$

Em que

x'_c e y'_c são as fotocoordenadas corrigidas das distorções

f é a distância focal calibrada

$$LA_1 = L_x r_{11} + L_y r_{21} + L_z r_{31}$$

$$LA_2 = L_x r_{12} + L_y r_{22} + L_z r_{32}$$

$$LA_3 = L_x r_{13} + L_y r_{23} + L_z r_{33}$$

Sendo L_x, L_y, L_z as componentes em x, y e z do deslocamento linear (*lever-arm*), e r_{ij} os elementos da matriz de rotação do INS, em que:

$$r_{11} = \cos \varphi \cos \kappa$$

$$r_{12} = \cos \varphi \sin \kappa$$

$$r_{13} = -\sin \varphi$$

$$r_{21} = \cos \kappa \sin \varphi \sin \omega - \cos \omega \sin \kappa$$

$$r_{22} = \cos \kappa \cos \omega + \sin \varphi \sin \kappa \sin \omega$$

$$r_{23} = \cos \varphi \sin \omega$$

$$r_{31} = \sin \kappa \sin \omega + \cos \kappa \sin \varphi \cos \omega$$

$$r_{32} = \sin \varphi \cos \omega \sin \kappa - \cos \kappa \sin \omega$$

$$r_{33} = \cos \varphi \cos \omega$$

Os m_{ij} correspondem aos elementos da matriz de rotação resultante da multiplicação entre as matrizes de rotação do INS e do desalinhamento angular (*boresight*), em que:

$$m_{11} = r_{11} + r_{12}(-\Delta\kappa) + r_{13}\Delta\varphi$$

$$m_{12} = r_{11}\Delta\kappa + r_{12} + r_{13}(-\Delta\omega)$$

$$m_{13} = r_{11}(-\Delta\varphi) + r_{12}\Delta\omega + r_{13}$$

$$m_{21} = r_{21} + r_{22}(-\Delta\kappa) + r_{23}\Delta\varphi$$

$$m_{22} = r_{21}\Delta\kappa + r_{22} + r_{23}(-\Delta\omega)$$

$$m_{23} = r_{21}(-\Delta\varphi) + r_{22}\Delta\omega + r_{23}$$

$$m_{31} = r_{31} + r_{32}(-\Delta\kappa) + r_{33}\Delta\varphi$$

$$m_{32} = r_{31}\Delta\kappa + r_{32} + r_{33}(-\Delta\omega)$$

$$m_{33} = r_{31}(-\Delta\varphi) + r_{32}\Delta\omega + r_{33}$$

A Equação (68) pode ser reescrita da seguinte forma, a saber:

$$a \left(X_0 + (z - Z_0) \frac{N_x}{D_n} \right) + b \left(Y_0 + (z - Z_0) \frac{N_y}{D_n} \right) + cz = -d \quad (69)$$

A Equação (69) é o modelo matemático proposto neste trabalho para estimativa do parâmetro de desalinhamento angular da montagem do sistema.

Admitindo que um conjunto finito de pontos foram coletados no espaço imagem que mapeia seu plano correspondente no espaço objeto, extraído na nuvem de pontos LiDAR, o modelo matemático proposto atende a condição $L_a = F(X_a)$ devendo os ângulos de desalinhamento do sistema (R_c^b) serem estimados via MMQ, a saber:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (70)$$

sendo X o vetor das correções dos parâmetros $(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta k)$, A representa a matriz das derivadas parciais das observações em função dos parâmetros, L é calculado em função de L_o (vetor das observações aproximadas) e L_b (vetor das observações) e P é a matriz dos pesos das observações.

Como pode ser observado na Equação (71) o parâmetro do plano d , que representa a distância da origem do sistema ao plano, é considerado como valor de observação no modelo proposto. Desta forma, com a propagação de variância covariância de $ax + by + cZ = d$ é determinado o desvio-padrão de d , como segue:

$$P = \frac{1}{\sigma_d^2}, \quad \sigma_d = \sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2} + \left(\frac{\sigma^2}{n_{plan}} \right) \quad (71)$$

sendo, C_x, C_y, C_z as coordenadas do centroide, σ^2 a variância nominal das coordenadas dos pontos na nuvem LiDAR e n_{plan} é o número de pontos contido em cada plano.

3.2.4 Avaliação do desalinhamento angular determinado no referencial de mapeamento

Para avaliar os valores estimados dos ângulos de desalinhamento usando o modelo proposto neste trabalho serão calculados 15 pontos no referencial de mapeamento através de intersecção fotogramétrica com georreferenciamento direto e calculado o EMQ, conforme Subitem 2.7, utilizando os 15 LCPs de verificação determinados por intersecção de planos. Como a precisão posicional planimétrica para os LCPs pode variar de 0,1 a 1,0 m (VOSSSELMAN e MAAS, 2010) será adotado o valor da precisão posicional do EMQ das discrepâncias (X, Y) igual a 0,40 m (duas vezes o desvio-padrão do equipamento LiDAR), e para a precisão altimétrica será adotado o EMQ das discrepâncias (Z) igual a 0,48 m, conforme Equação (72) descrita em (ALAMÚS e WOLFGANG, 2008), que considera o valor médio da altura de voo (1600 m), o valor médio da aerobase (452 m), o tamanho do pixel

(6 μ m) e a distância focal aproximada (100,4mm).

$$d_z = \sqrt{2} \cdot \frac{H^2}{B \cdot f} \cdot \sigma_{pix} \quad (72)$$

sendo H o valor médio da altura de voo, B o valor médio da aerobase, f a distância focal e σ_{pix} o tamanho do pixel.

Para a avaliação estatística das discrepâncias das componentes X , Y e Z resultantes dos 15 LCPs de verificação será usado o teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($\sigma = 0,05$) e para verificar a existência de tendência nas discrepâncias será empregado o teste t de *Student* ($\sigma = 0,05$). Para analisar se os dados possuem uma distribuição normal com o teste de *Shapiro-Wilk*, as seguintes hipóteses serão confrontadas, a saber:

$$H_0: X \sim N(\mu, \sigma) \quad (73)$$

$$H_1: X \not\sim N(\mu, \sigma) \quad (74)$$

Sendo assim, o valor do teste de *Shapiro-Wilk* é obtido da seguinte forma a saber:

$$W = \frac{b^2}{(n-1) \cdot s^2} \quad (75)$$

sendo s o valor do desvio-padrão amostral, n o número de dados, $b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{i,n} \cdot (x_{(i-1+n)} - x_i)$ e o coeficiente $a_{i,n}$ é retirado da tabela estatística *Shapiro-Wilk*.

Após o cálculo de W , a hipótese nula será aceita ao nível de significância σ , se o valor de W calculado for menor do que o valor de W retirado da tabela estatística *Shapiro-Wilk*. O teste t de *Student* foi realizado para verificação da existência de tendências nas discrepâncias. As seguintes hipóteses devem ser confrontadas:

$$H_0: \mu = \mu_o \quad (76)$$

$$H_1: \mu \neq \mu_o \quad (77)$$

Considerando $\mu_o = 0$, a hipótese nula (H_0) parte da premissa que a média populacional estimada (μ) é igual a zero. Por outro lado, a hipótese alternativa (H_1) pressupõe que a média populacional estimada é diferente de μ_o . Os valores das médias populacionais foram calculados a partir das amostras para as componentes X , Y e Z . Para

comprovar a aceitação ou rejeição de H_o , calculou-se a estatística amostral $t_{calc.}$. Baseado na média amostral (\bar{x}), no desvio-padrão (s), no tamanho da amostra (n):

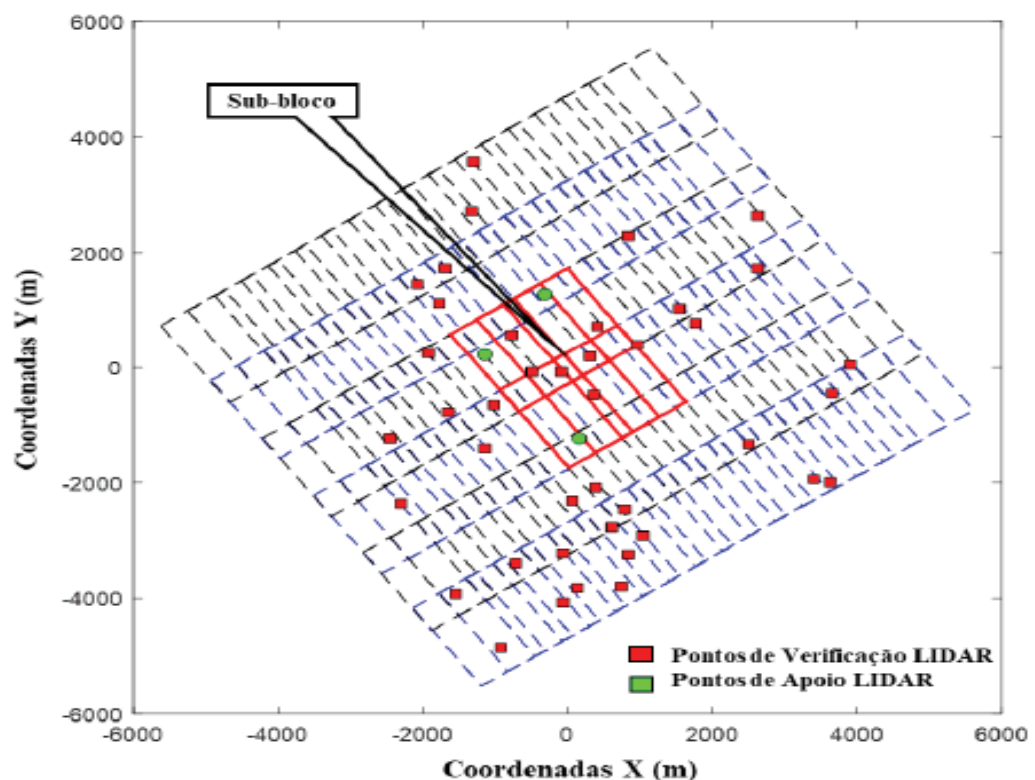
$$t_{calc.} = \frac{(\bar{x} - \mu_o)}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (78)$$

A hipótese nula (H_o) será aceita ao nível de significância α , se o valor absoluto da estatística amostral calculada ($t_{calc.}$) for menor que o valor de *Student* tabelado ($t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$). A seguir serão apresentados os experimentos e a discussão dos resultados obtidos com o método proposto.

4 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este Capítulo do trabalho apresenta os experimentos e a análise dos resultados obtidos com o método proposto para estimativa do parâmetro de desalinhamento angular (*boresight angles*). Como descrito anteriormente, os POIs foram obtidos por COSTA et.al. (2018). Os autores empregaram o método *in situ* usando 6 imagens aéreas, sendo 3 na direção de voo nordeste e 3 na direção de voo sudoeste em cada direção de voo, e três pontos LiDAR de controle. A FIGURA 24 mostra a configuração do bloco e do sub-bloco fotogramétrico usado no processo de calibração da câmera UltraCam XP, os três LCPs coletados no sub-bloco fotogramétrico (representados na cor verde) e a distribuição dos pontos de verificação, também extraídos da nuvem LiDAR.

FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DO SUB-BLOCO E PONTOS DE VERIFICAÇÃO COLETADOS NA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: COSTA et al. (2018)

A TABELA 4 mostra os valores da distância focal calibrada da câmera e as coordenadas do ponto principal calibrado.

TABELA 4 – RESULTADOS DOS POIs CALIBRADOS

Parâmetros de Orientação Interior	
f (mm)	100,35
x_o (mm)	-0,133
y_o (mm)	0,000

FONTE: COSTA et.al. (2018).

A primeira etapa do método proposto consiste em filtrar a nuvem de pontos separando os pontos que estão no nível de solo, dos pontos pertencentes a árvores e edificações. Isto é feito pelo Filtro Morfológico Progressivo. Em seguida, o algoritmo RANSAC é usado para extrair os planos de telhados na nuvem de pontos LiDAR filtrada. As variáveis que definem as tolerâncias exigidas para o funcionamento do Filtro Morfológico Progressivo e do algoritmo RANSAC são apresentados na TABELA 5.

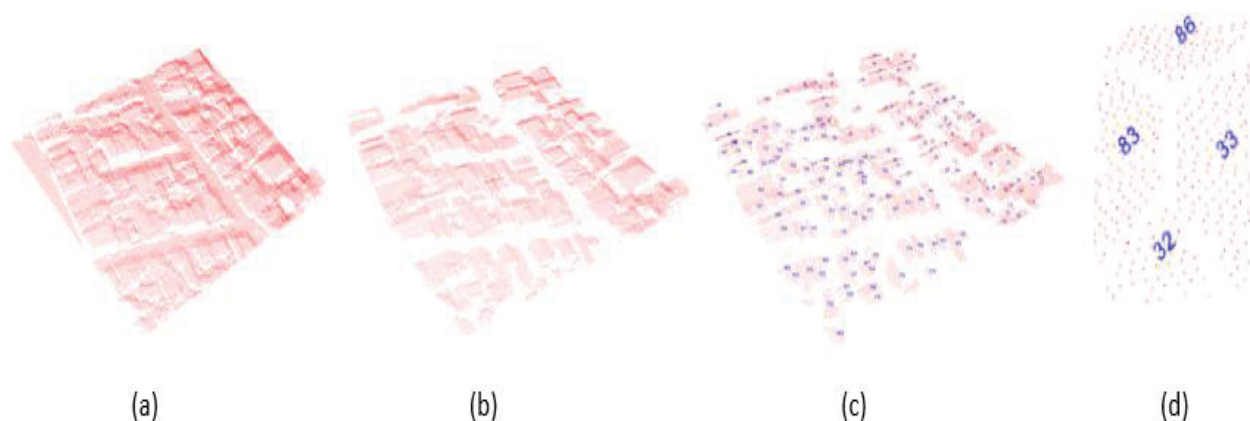
TABELA 5 – PARÂMETROS DOS FILTROS MORFOLÓGICO PROGRESSIVO E RANSAC USADOS NESTE TRABALHO

Parâmetros do filtro morfológico progressivo	
Tamanho da célula	1 m
Base	2 células
Declividade	0,05 (5%)
Limiar de diferença de elevação inicial	2 m
Maior diferença de elevação	10 m
Tamanho máximo da janela	65 células
Parâmetros do filtro RANSAC	
Número de vizinhos	20
Número de conjuntos mínimos	10
Tolerância	20 cm
Número mínimo de <i>inliers</i>	15
Ângulo mínimo do plano	10°
Ângulo máximo de planos	80°
Tamanho mínimo do conjunto de pontos	40
Tamanho máximo do conjunto de pontos	10000
Número de vizinhos	20

Tolerância angular	3°
Raio (<i>outlier removal</i>)	4 m
Quantidade de pontos mínimos (<i>outlier removal</i>)	8
Resíduo máximo permitido	10 cm

A FIGURA 25 mostra a nuvem de pontos LiDAR original, a nuvem filtrada pelo Filtro Morfológico Progressivo e os planos de telhados extraídos com o RANSAC.

FIGURA 25 – (a) NUVEM DE PONTOS LIDAR ORIGINAL, (b) RESULTADO OBTIDO COM O FILTRO MORFOLÓGICO PROGRESSIVO, (c) PLANOS DE TELHADOS EXTRAÍDOS COM O ALGORITMO RANSAC, (d) IMAGEM APROXIMADA DOS PLANOS EXTRAÍDOS



FONTE: O autor (2019)

Após aplicar o algoritmo RANSAC, os parâmetros dos planos de telhado são estimados usando o método de PATHAK et al. (2010), descrito na Subseção 3.2.1. Por fim, é obtido um arquivo em formato texto contendo os valores dos parâmetros dos planos, as coordenadas do centroide de cada plano e o número de pontos contidos em cada plano de telhado extraído.

Para cada plano de telhado extraído na nuvem de pontos LiDAR foi manualmente coletado um ponto qualquer do telhado correspondente na imagem digital. A TABELA 6 mostra o número de planos de telhado LiDAR e o número de pontos de verificação, respectivamente utilizados na estimativa dos ângulos de desalinhamento da montagem do sistema e na análise de qualidade dos dados.

TABELA 6 – NÚMERO DE PLANOS DE TELHADO LiDAR E PONTOS DE VERIFICAÇÃO LiDAR

Planos de Telhados	Pontos de Verificação
--------------------	-----------------------

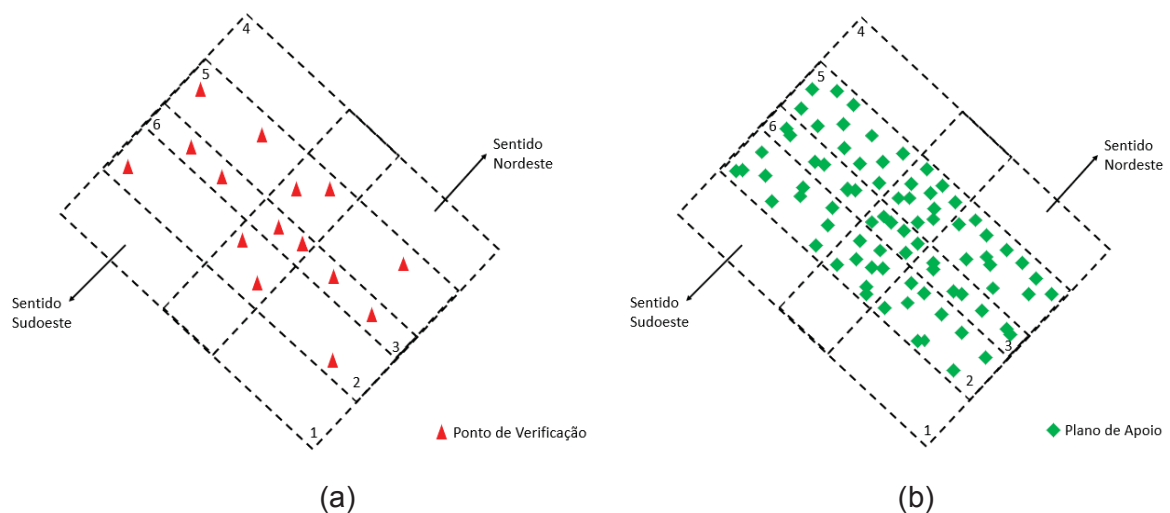
76 planos

15 LCPs

FONTE: O autor (2019).

Neste trabalho, foi adotado a configuração do sub-bloco proposta por Costa (2019) para a determinação dos parâmetros de montagem do sistema, isto é, o ajustamento por feixes de raios de luz perspectivo é realizado usando 6 imagens de um sub-bloco fotogramétrico (EXPERIMENTO A) e uma faixa fotogramétrica contendo 3 imagens obtidas na direção nordeste do alinhamento de voo e 3 imagens aéreas tomadas na direção sudoeste da trajetória de voo (EXPERIMENTO B). A FIGURA 26 mostra o sub-bloco fotogramétrico, bem como a distribuição dos pontos de verificação e dos planos de telhados usados como apoio de campo usados nos experimentos A e B.

FIGURA 26 – (a) CONFIGURAÇÃO DOS SUB-BLOCOS NOS SENTIDOS SUDOESTE E NORDESTE, (b) DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS DE TELHADO.



FONTE: O autor (2019).

Vale salientar que, para o EXPERIMENTO B há 6 parâmetros de desalinhamento a ser determinados, sendo três parâmetros no sentido sudoeste ($\Delta\omega_{SO}$, $\Delta\varphi_{SO}$, $\Delta\kappa_{SO}$) e três parâmetros no sentido nordeste ($\Delta\omega_{NE}$, $\Delta\varphi_{NE}$, $\Delta\kappa_{NE}$). TABELA 7 mostra o valor dos ângulos de desalinhamento estimados no EXPERIMENTO A.

TABELA 7 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO PARA O EXPERIMENTO A

Δ do desalinhamento angular	Valor Único	Desvios-padrões
$\Delta\omega$	10' 30,11"	48,67"
$\Delta\varphi$	-1' 12,18"	53,21"
$\Delta\kappa$	11' 34,65"	2' 27,06"

FONTE : O autor (2019).

Como mostra a TABELA 7, os ângulos de desalinhamento determinados por este experimento possuem seus valores absolutos maiores que seus desvios-padrão e maiores que a imprecisão do INS (18 arcseg). Com o emprego da intersecção fotogramétrica, os valores de EMQ da discrepância dos pontos LiDAR de verificação foi de 1,37 m para planimetria e 1,80 m para a altimetria. A TABELA 8 apresenta os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* ($W_{(15,0.05)} = 0,881$) para avaliação estatística das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação.

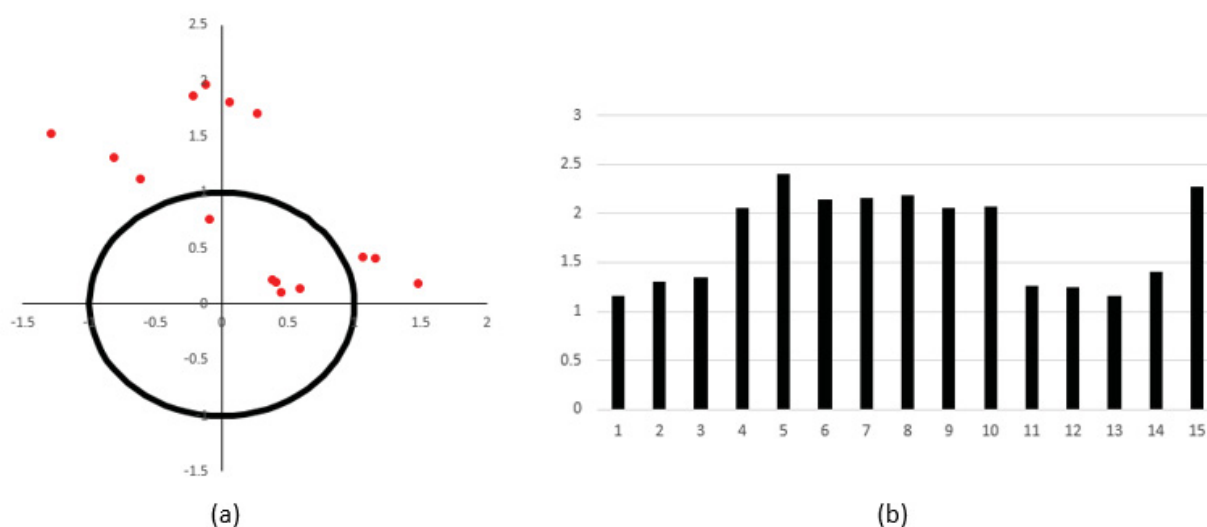
TABELA 8 – RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA O EXPERIMENTO A COM ABORDAGEM 1

x		y		z	
$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor
0,982	0,968	0,860	0,024	0,827	0,008

FONTE: O autor (2019).

Como pode ser observado na TABELA 8, as componentes y e z não possuem distribuição normal, uma vez que $W_{calc.} < W_{(15,0.05)}$, indicando a presença de erros sistemáticos. A FIGURA 27 apresenta a discrepância planimétrica e altimétrica dos pontos de verificação para o EXPERIMENTO A.

FIGURA 27 – DISCREPÂNCIA (a) PLANIMÉTRICA e (b) ALTIMÉTRICA PARA O EXPERIMENTO A



FONTE: O autor (2019)

Os resultados das discrepâncias planimétricas e altimétricas encontradas foram maiores do que os valores adotados como precisão planimétrica e altimétrica, os quais foram de 0,40 m e 0,48 m, respectivamente. Este resultado pode estar relacionado a algum pré-processamento da atitude do INS realizado pela empresa de aerolevantamento, ou ainda, os valores de $\Delta\omega$, $\Delta\phi$ e $\Delta\kappa$ ajustados na calibração podem ter sofrido influência da porcentagem de sobreposição longitudinal e lateral entre as imagens do sub-bloco fotogramétrico. A TABELA 9 apresenta os resultados do teste de tendência *t de Student*, com nível de significância (α) de 5% para avaliação estatística da discrepância das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação.

TABELA 9 – RESULTADOS DO TESTE ESTATISTICO *t* DE *STUDENT*

<i>x</i>			<i>y</i>			<i>z</i>		
p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$
0,822	0,933	2,145	0,0002	4,910	2,145	0,9 e-8	14,205	2,145

FONTE: O autor (2019)

Como pode ser observado na TABELA 9, há tendência nas coordenadas *y* e *z*, uma vez que apresentaram o p-valor abaixo de 0,05 e valor absoluto de t_{calc} maiores que $t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$. A tendência nos componentes *y* e *z* podem estar relacionadas a correlação entre os POIs e os POEs, além de também poderem estar relacionadas a algum pré-processamento da atitude do INS realizado pela empresa de aerolevantamento. A TABELA 10 mostra o valor dos ângulos de desalinhamento estimados no EXPERIMENTO B.

TABELA 10 – RESULTADOS OBTIDOS COM O MÉTODO PROPOSTO PARA O EXPERIMENTO B

Δ do desalinhamento	Direção Nordeste	Desvios-padrão	Direção Sudoeste	Desvios-padrão
$\Delta\omega$	4' 26,43"	1' 24,98"	17' 18,12"	1' 12,39"
$\Delta\phi$	7' 5,88"	1' 13,84"	- 7' 48,51"	1' 18,17"
$\Delta\kappa$	17,98"	5' 36,83"	- 4' 40,96"	1' 18,17"

FONTE : O autor (2019).

Os valores dos EMQs da discrepância dos pontos de verificação encontrados com foram de 0,274 m para planimetria e 0,335 m para a altimetria, considerando a direção nordeste do alinhamento da faixa de voo. Já para o alinhamento da faixa na direção sudoeste obteve-se um EMQ da discrepância dos pontos de 0,340 m para planimetria e

0,331 m para a altimetria. Como pode ser observado, os valores obtidos estão dentro do limiar adotado de precisão para as discrepâncias planimétricas e altimétricas. Pode-se observar que o desvio-padrão calculado para o ângulo de desalinhamento $\Delta\kappa$ para o sentido nordeste é maior do que o valor do desalinhamento. A TABELA 11 apresenta os resultados do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* (S-W), com valores retirados da tabela S-W para o sentido de voo nordeste, utilizando oito LCPs, e α com valor de 0,05, $W_{(8;0,05)} = 0,818$, e para o sentido de voo sudoeste, com sete LCPs, e α com valor de 0,05, $W_{(7;0,05)} = 0,803$. Como pode ser observado, $W_{calc.} > W_{tabela}$ para as três componentes analisadas, com isso, conclui-se que as discrepâncias para as componentes X, Y e Z possuem uma distribuição normal.

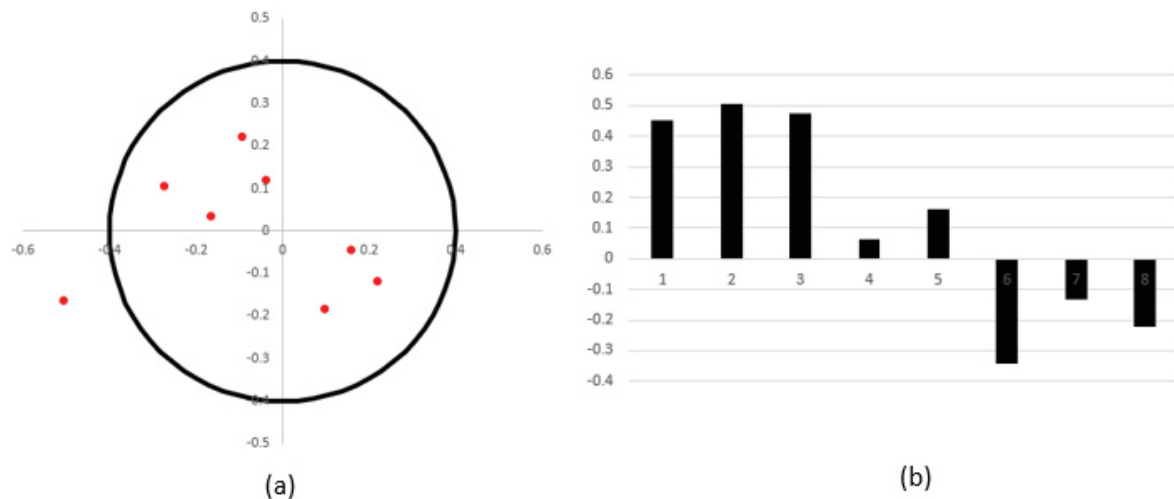
TABELA 11 - RESULTADOS DO TESTE DE NORMALIDADE *SHAPIRO-WILK* PARA O EXPERIMENTO B PARA A DIREÇÃO NORDESTE (NE) E SUDOESTE (SO)

NORDESTE					
x		y		z	
$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor
0,961	0,820	0,942	0,641	0,904	0,819
SUDOESTE					
x		y		z	
$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor	$W_{calc.}$	p-valor
0,866	0,179	0,869	0,188	0,867	0,183

FONTE: O autor (2019)

A FIGURA 28 apresenta a discrepância planimétrica e altimétrica dos oito pontos de verificação utilizados para a análise estatística para a faixa de voo no sentido nordeste. Nota-se que apenas uma discrepância ultrapassou o limiar de precisão adotado para planimetria, que foi de 0,53 m. Já para a altimetria foi obtido um valor de 0,50 m, ultrapassando o limiar de precisão adotado para discrepância altimétrica.

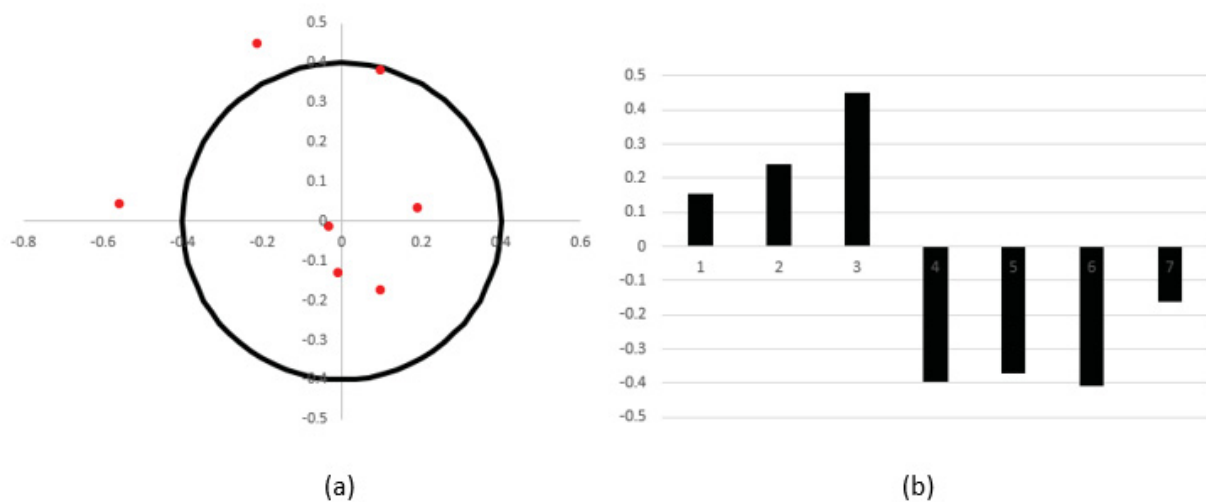
FIGURA 28 – DISCREPÂNCIA (a) PLANIMÉTRICA e (b) ALTIMÉTRICA PARA A DIREÇÃO NORDESTE



FONTE: O autor (2019)

A FIGURA 29 apresenta as discrepâncias planimétrica e altimétrica dos sete pontos LCPs de verificação utilizados para a análise estatística para a faixa de voo no sentido sudoeste. Nota-se que dois pontos ultrapassaram o limiar de precisão adotado para discrepância planimétrica, que foram de 0,56 m e 0,49 m, enquanto para a altimetria todos os pontos permaneceram dentro do limiar de precisão adotado para discrepância.

FIGURA 29 – DISCREPÂNCIA (a) PLANIMÉTRICA e (b) ALTIMÉTRICA PARA A DIREÇÃO SUDOESTE



FONTE: O autor (2019)

A TABELA 12 apresenta os resultados do teste de tendência *t de Student* com nível de significância (α) de 5% para avaliação estatística das discrepâncias da planimetria e da

altimetria dos pontos de verificação para as direções de voo nordeste e sudoeste, respectivamente.

TABELA 12 – RESULTADOS DO TESTE ESTATÍSTICO t DE STUDENT

NORDESTE								
x			y			z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$
0,401	-0,892	2,145	0,954	-0,058	2,145	0,345	1,010	2,145
SUDOESTE								
x			y			z		
p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$	p-valor	t_{calc}	$t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$
0,543	-0,643	2,145	0,385	0,935	2,145	0,611	-0,535	2,145

FONTE: O autor (2019)

Como pode ser observado na TABELA 12, tanto na planimetria quanto na altimetria foi obtido o p-valor maior que 0,05 e valores absolutos de t_{calc} menores que $t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$. Desta forma, pode-se dizer que os pontos não possuem tendência, o que valida os resultados obtidos dos EMQ dentro do limiar de precisão adotado. A TABELA 13 apresenta uma síntese dos resultados das discrepâncias dos pontos de verificação obtidos nos experimentos A e B.

TABELA 13 – SÍNTESE DOS RESULTADOS

EXPERIMENTO		Planimetria (m)	Altimetria (m)
EXPERIMENTO A	Valor Mínimo	0,43	1,15
	EMQ	1,37	1,80
	Valor Máximo	1,99	2,36
EXPERIMENTO B sentido nordeste	Valor Mínimo	0,125	0,062
	EMQ	0,274	0,335
	Valor Máximo	0,531	0,504
EXPERIMENTO B sentido sudoeste	Valor Mínimo	0,036	0,154
	EMQ	0,340	0,331
	Valor Máximo	0,560	0,440

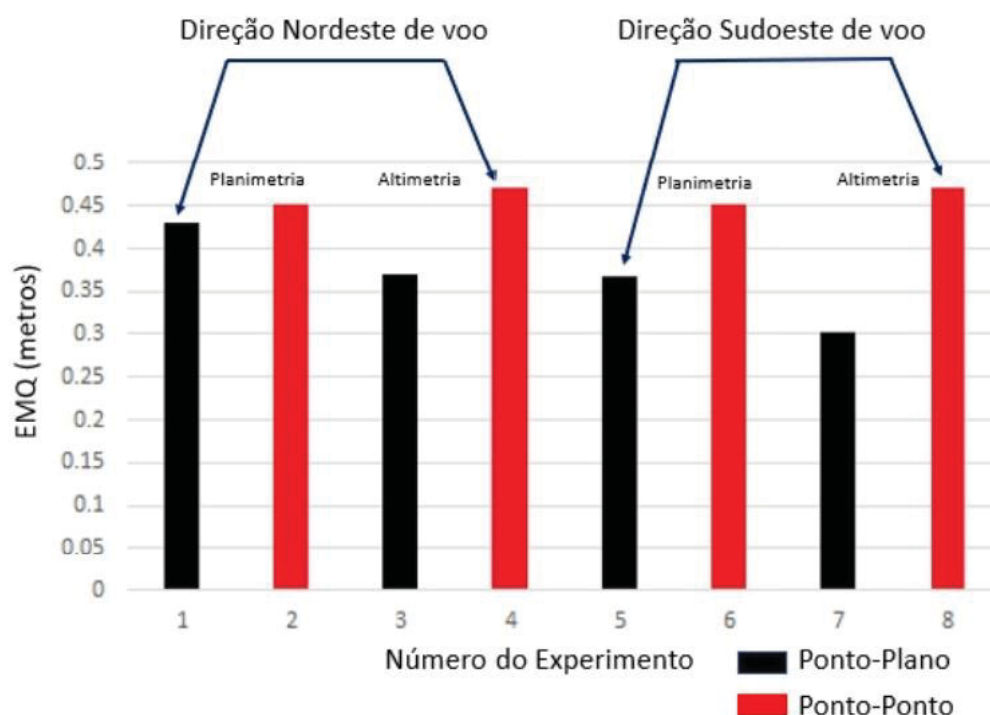
FONTE: O autor (2019).

Como pode ser observado na TABELA 13, os valores dos desalinhamentos angulares obtidos como valor único (EXPERIMENTO A) para o bloco fotogramétrico usando o método proposto resultaram em uma baixa contribuição para melhoria na exatidão

planialtimétrica dos dados. No entanto, quando o método é empregado no sub-bloco separando os sentidos de voo foi possível encontrar melhor grau de confiabilidade planialtimétrica. Conforme os resultados obtidos no EXPERIMENTO B, o EMQ planimétrico foi de 0,274 m para a faixa de voo no sentido nordeste e o EMQ altimétrico foi de 0,335 m. Já para a faixa de voo no sentido sudoeste, o resultado do EMQ planimétrico foi de 0,340 m e altimétrico de 0,331 m.

Para avaliar o grau de compatibilidade do método proposto neste trabalho com métodos existentes na literatura, foi feita uma comparação entre a abordagem ponto-a-plano proposta e o método de Costa (2019). A mesma área de estudo e a mesma configuração de voos, isto é, experimentos A (valor único para todo o bloco fotogramétrico) e B (separados por sentido de voo) foram realizados. A FIGURA 30 mostra os valores de EMQ obtidos com o método proposto e com o método de Costa (2019) para cada um dos experimentos supracitados.

FIGURA 30 – EMQ PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO OBTIDO COM O MÉTODO PROPOSTO E COM O MÉTODO DE COSTA (2019)



FONTE: O autor (2019)

Na FIGURA 30, os experimentos 1, 2, 3 e 4 correspondem aos EMQ planimétricos e altimétricos obtidos para o sentido Nordeste de voo, utilizando as abordagens ponto-a-ponto e ponto-a-plano (proposto). Já os experimentos 9, 10, 11 e 12, representam o EMQ

para os valores de desalinhamento angular para o sentido Sudoeste de voo. Como pode ser observado, o EMQ obtido com o método proposto neste trabalho apresentou um EMQ menor do que o método de Costa (2019). Na abordagem ponto-a-ponto, o valor determinado para $\Delta\omega$ teve seu valor absoluto menor do que seu desvio-padrão e menor do que a precisão nominal do equipamento INS. O valor determinado para $\Delta\varphi$ teve seu valor absoluto menor do que a precisão nominal do equipamento INS. De modo análogo ao sentido nordeste, para o sentido sudoeste, as discrepâncias nas componentes x , y e z apresentaram uma distribuição normal e uma leve tendência na planimetria, conforme teste t de *Student*. Na abordagem ponto-a-plano, para o sentido de voo Sudoeste, os valores determinados para $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$ e $\Delta\kappa$ foram significativos e contribuíram para a melhoria posicional. Para os testes estatísticos utilizando a abordagem ponto-a-plano, as discrepâncias calculadas apresentaram distribuição normal e sem tendência. A seguir serão apresentados as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método para estimativa do parâmetro de desalinhamento angular de montagem de um sistema fotogramétrico aerotransportado. A principal característica do método proposto é o desenvolvimento de um modelo matemático baseado em uma abordagem ponto-a-plano para a determinação dos parâmetros de montagem do sistema que, particularmente, mapeia um ponto na imagem digital em seu plano de telhado correspondente na nuvem de pontos LiDAR. O apoio de campo é composto por planos de telhados extraídos automaticamente de nuvens de pontos LiDAR aerotransportado. O modelo proposto foi testado em um sub-bloco de imagens aéreas digitais e os resultados obtidos mostraram que:

- De acordo com os resultados obtidos o EMQ planimétrico no EXPERIMENTO B é de 0,274 m para o sentido nordeste e 0,340 m para o sentido sudoeste. Desta forma, planos de telhados podem servir como apoio de campo no processo de determinação dos parâmetros de montagem do sistema.
- O emprego do modelo ponto-a-plano não exige correspondência exata entre as primitivas, descartando necessidade de pontaria na coleta dos pontos no espaço imagem.
- Superfícies planas são robustas à *outliers* presentes na nuvem de pontos, são menos influenciadas pela baixa amostragem de pontos e não dependem de pré-sinalização de alvos ou intersecção de planos adjacentes para extração de pontos LiDAR, como feito em COSTA et al. (2018).
- A estimativa dos parâmetros de montagem do sistema usando o método simultâneo de calibração incluindo como parâmetro dois conjuntos de desalinhamento angular apresentou melhoria na acurácia planialtimétrica (EXPERIMENTO B), quando comparado com os resultados obtidos utilizando um valor único de desalinhamento para o sub-bloco de imagens (EXPERIMENTO A), como demonstrado por COSTA (2019).

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros recomenda-se a realização exaustiva de testes em voos executados com diferentes configurações, verificar a possibilidade do emprego de planos de solo, combinar diferentes tipos de primitivas e estudar a correlação entre os parâmetros envolvidos.

REFERÊNCIAS

- ALAMÚS, R.; WOLFGANG, K. **DMC geometry analysis and virtual image characterisation**. *The Photogrammetric Record*, 23, 2008. 353-371.
- ANDRADE, J. B. D. **Fotogrametria**. 2ª. ed. Curitiba: SBEE, 2003.
- BÄUMKER, M.; HEIMES, F.J. **New calibration and computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular data of an hybrid inertial navigation system**. OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation, 2001.
- BROWN, D.. **Close range camera calibration**, *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, 1971.
- BURMAN, H. **Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS**. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. v. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 2000.
- CASELLA V., R. GALETTO, M. FRANZINI. **An Italian Project on the Evaluation of Direct Georeferencing in Photogrammetry**. DIET – University of Pavia, via Ferrata, 1 - 27100 Pavia – Italy, 2004.
- CHIANG, K. W., TSAI, M. L., NASER, E. S., HABIB, A., CHU, C. H.. **A new calibration method using low cost MEM IMUs to verify the performance of UAV-borne MMS payloads**. *Sensors (Switzerland)*, 2015.
- COLOMINA, I. **GPS, INS and Aerial Triangulation: what is the best way for the operational determination of photogrammetric image orientation?** Presented at the ISPRS Conference Automatic Extraction of GIS Objects Digital Imagery, München, Germany., 1999.
- COSTA, F.A.L.; MITISHITA, E.A.; CENTENO, J.A.S. **A study of integration of LIDAR and photogrammetric data sets by indirect georeferencing and in situ camera calibration**. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2017.
- COSTA, F.A.L. **Estudo da Integração de dados LiDAR com fotogramétricos com georreferenciamento direto**. Tese Doutorado. UFPR , 2019.
- CRAMER, M.. **Direct geocoding – is aerial triangulation obsolete?** *Photogrammetric Week 1999* (D. Fritsch, and R. Spiller, editors), Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 59–70, 1999.
- CRAMER M., STALLMANN D., HAALA N. **Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications**. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000.
- CRAMER, M., D. STALLMANN. **System Calibration for Direct Georeferencing**, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A):79–84, 2002.

CRAMER, M. **The EuroSDR Performance Test for Digital Aerial Camera Systems.** Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.

CUREY, R. K., ASH, M. E., THIELMAN, L. O., BARKER, C. H.. **Proposed IEEE inertial systems terminology standard and other inertial sensor standards.** IEEE Position Location Navigation Symposium 2004, Monterey, California, 2004.

DEBIASI, P. **Desenvolvimento de Metodologias de Calibração de uma câmera digital de baixo custo integrada com um sistema LiDAR.** Tese de doutorado. UFPR, 2012.

DCT/DSG. **Norma da especificação técnica para produtos de conjuntos de dados geoespaciais.** 1ª. Edição. Brasília, 2016.

ERCOLIN, L. F.. **Calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto.** UFPR, 2017.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381-395, 1981.

FRYER J., C. BROWN. **Lens distortion for close-range photogrammetry.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing · January 1986

GABRLIK P., COUR-HARBO A., KALUADOVA P., ZALUD L., JANATA P.. **Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry.** CEITEC – Central European Institute of Technology, 2018.

GNEENISS, A.S.; MILLS, J.P.; MILLER, P.E. **In-flight photogrammetric camera calibration and validation via complementary LiDAR.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 100, 2015.

GNEENISS, A.. **Integration of LiDAR and Photogrammetric Data for Enhanced Aerial Triangulation and Camera Calibration.** Newcastle University, 2013.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. A.. **Direct Sensor Orientation in Airborne and Land-based Mapping Applications, Report No. 461,** Geodetic GeoInformation Science, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, 2001.

GRUBER, M. **UltracamX, the new digital aerial camera system by Microsoft Photogrammetry.** Proceedings of Photogrammetric Week 2007. Stuttgart.

HABIB, A., JARVIS A., DETCHEV I., STENSAAS G., MOE D., CHRISTOPHERSON J.. **Standards and specifications for the calibration and stability of amateur digital cameras for close-range mapping applications.** The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences–ISPRS Congress Beijing 2008.

HABIB, A.; KERSTING, A. P.. **Analysis of Control and Flight Configuration Requirements for Mounting Parameters Calibration of Gps / Ins-Assisted Photogrammetric Systems.** Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2010.

HABIB, A.; SCHENK T. **Accuracy Analysis of Reconstructed Points in Object Space from Direct and Indirect Exterior Orientation Methods**. OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveying, University of Hannover, 17-18 September, 2001.

HABIB A., ZHOU T., MASJEDI A., CRAWFORD M.. **Boresight calibration of GNSS/INS Assisted push-broom hyperspectral scanners on UAV**. IEEE Journal, 2018 a.

HABIB A., RAVI R., SHAMSELDIN T., ELBAHNASAWY M.. **Bias impact and calibration of UAV-based mobile LiDAR system with spinning multi-beam laser scanner**. Lyles School of Civil Engineering, Purdue University, 2018 b.

HEIPKE, C., JACOBSEN K., WEGMANN H.. **Analysis of the Results of the OEEPE Test “Integrated Sensor Orientation”, *Integrated Sensor Orientation, Test Report and Workshop Proceedings***. OEEPE Official Publication No. 43, pp. 31–49, 2002.

HONKAVARA, E., ILVES R., JAAKKOLA, J. **Practical results of GPS/IMU camera system calibration**, *Proceedings of International Workshop: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation*, 2003.

HONKAVAARA, E. **In-Flight Camera Calibration for Direct Georeferencing**, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(1):166–171, 2004.

JACOBSEN, K.. **Determination of Image Orientation Supported by IMU and GPS**. *Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/1, I/3 and IV/4 – Sensors and Mapping from Space*, Hannover, 1999.

JACOBSEN, K.. **Combined Bundle Block Adjustment versus Direct Sensor Orientation**, *ASPRS Annual Convention 2000*, Washington, 2000.

JACOBSEN, K.. **Aspects of Handling Image Orientation by Direct Sensor Orientation**, *ASPRS annual convention St. Louis 2001*.

JACOBSEN K. **Issues and Method for In-Flight and On-Orbit Calibration**, *Workshop on Radiometric and Geometric Calibration*, December 2-5, Gulfport, Mississippi, USA, 2003.

JACOBSEN, K.. **Direct/ Integrated Sensor Orientation – Pros and Cons**, *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(Part B3):829–835, 2004.

JACOBSEN K. **Recent Developments of Digital Cameras and Space Imagery**. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation, 2011.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Journal of basic Engineering**, v. 82, n. Series D, p. 35-45, 1960.

KERSTING, A. P. B. **Quality Assurance of Multi-Sensor Systems**. 295 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Calgary, 2011.

KIM, E.M., HABIB, A., PULLIVELLI, A., MITISHITA, E., GHANMA, M.. **Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different geo-referencing techniques**, *The Photogrammetric Record* 21(113):29-43, 2006.

LADSTÄDTER, R., GRUBER, M.. **Geometric Aspects concerning the photogrammetric workflow of the digital aerial camera UltraCamx**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Commission I, WG I/4, Bijing, 2008.

LEBERL, F.; GRUBER, M. **Flying the new large format digital aerial camera Ultracam**. **Photogrammetric Week 03**. Anais... . p.67-76, 2003.

MARANHAO, V. C. **Modelagem e controle de qualidade de uma infraestrutura de dados espaciais para o Estado de Pernambuco**. Dissertacao (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife, 2013.

MIKHAIL, E., J. BETHEL, J. MCGLONE. **Introduction to modern photogrammetry**. John Wiley & Sons, New York, 479p.

MITISHITA, E. A. ; MACHADO, A. M. L. ; CENTENO, J. A. S. . **Integração de dados laser scanner e imagem orbital de alta resolução visando a modelagem tridimensional de edificações**. In: II SIMGEO, 2008, Recife. Anais do II SIMGEO. Recife, 2008. v. 1. p. 1-10.

MITISHITA E., COSTA F., MARLO M.. **Study of the Integration of LiDAR and Photogrammetric Datasets by In Situ Camera Calibration and Integrated Sensor Orientation**. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017.

MONICO J.F.G.. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentação e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

MONIWA, H. **Analytical Camera Calibration for Close-Range Photogrammetry**. New Brunswick. Thesis, Master of Science, University of New Brunswick, 1972, 104p.

PATHAK K., BIRK A., VASKEVICIUS N., POPPINGA J. **Fast Registration Based on Noisy Planes With Unknown Correspondences for 3-D Mapping**. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 424-441, June 2010.

PINTO, L., FORLANI, G.. **A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry**, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(Part B3): 210–213, 2002.

SCHERZINGER, B. M. **History of inertial navigation systems in survey applications**. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(11): 1225–1227, 2001.

SCHOLZ, S., GRUBER M.. **Radiometric and geometric quality aspects of the large format aerail camera ultracam xp**. Microsoft Photogrammetry, Anzengrubergergasse 8/4, A-8010 Graz, 2009.

SHAN, J; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

SKALLOUD, J.. **Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS**,

Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Canada, 179 p., 1999.

SKALOUD J., SCHAEER P. **Towards A More Rigorous Boresight Calibration**. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), 2003.

SMITH, M. J., K. S. QTAISHAT, D.W.G. PARK, A. JAMIESON. **IMU and Digital Aerial Camera Misalignment Calibration**, *Proceedings EuroCow 2006*.

STEINBRUCH, A., WINTERLE, P.. **Geometria Analítica**. São Paulo:McGraw-Hill, 2006.

THOM C., Y. RABOT. **Study Of Lever-Arm Effect Using Embedded Photogrammetry And On-Board Gps Receiver On Uav For Metrological Mapping Purpose And Proposal Of A Free Ground Measurements Calibration Procedure**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W4, 2016

TOTH, C.K. **Direct Platform orientation of multi-sensor data acquisition system**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32, 1998.

TOTH, C.K. **Experiences with frame CCD Arrays and Direct Georeferencing**. Photogrammetric Week 1999.

TSAI M.L., CHIANG K.W., HUANG Y.W., LO C.F., LIN Y.S. **The development of a UAV based MMS platform and its applications**; Proceedings of the 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology; Cracow city, Poland. 13–16 June 2011.

VOSSSELMAN,G; MAAS,H.G. **Airborne and terrestrial laser scanning**. Whittles Publishing, 2010.

WEGMANN, H.. **Image Orientation by Combined (A) AT with GPS and IMU**, *ISPRS Com. I, Midterm Symposium, Integrated Remote Sensing at the Global, Regional, and Local Scale*, Denver, U.S.A., 10-15 November 2002.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, pp. 68-82. 1999.

YASTIKLI, N., JACOBSEN K. **Direct Sensor Orientation for Large Scale Mapping-Potential, Problems, and Solutions**, *The Photogrammetric Record*, 20(111): 274–284, 2005.

YUAN, X.. **A novel method of systematic error compensation for a position and orientation system**, *Progress in Nature Science*, 18(8): 953–963, 2008.

ZHANG K; CHEN S.C.; WHITMAN D.; SHYU M.L.; YAN, J.; ZHANG, C.A. **Progressive Morphological filter for removing nonground measurements from airborne LiDAR data**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v.41, n.4, p.872-882, 2003.

ZHOU G., S. REICHLE. **UAV-based multi-sensor data fusion processing**. Batten Colege of Engineering and Technology, 2010.